

# Diseño preliminar de un buque 'heavy lift' semisumergible

**Treball Final de Grau**



Facultad de Náutica de Barcelona  
Universidad Politécnica de Cataluña

Trabajo realizado por:  
**Oriol Costillas Vilasís**

Dirigido por:  
**Joel Jurado Granados**

GESTN

Barcelona, 03/2018



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Facultat de Nàutica de Barcelona

Departamento de ciencia e ingeniería náutica









---

# **Agradecimientos**

En primer lugar, a Joel Jurado, tutor del proyecto, que en su día me aceptó el trabajo y me ha apoyado en todo el transcurso de la realización de este. Agradezco mucho su paciencia y su manera proporcionarme ayuda, siempre animándome a resolver los problemas por mi cuenta.

En segundo lugar, a mi familia y amigos, que siempre me han ayudado y apoyado en el que ha sido el mayor proyecto realizado hasta la fecha. Me siento muy afortunado de que a pesar todo el tiempo utilizado para acabar el trabajo siempre hayan estado ahí.

Finalmente, aunque no por ello menos importante, gracias a la FNB-UPC por proporcionarme los conocimientos necesarios para ser cada día más competente y por haberme regalado una de las mejores etapas de mi vida.

Gracias a todos.

---

---

# **Resumen**

En el presente proyecto, se realiza un diseño preliminar de un buque mercante de grandes dimensiones, la finalidad del cual es el transporte de grandes plataformas petrolíferas a lo largo de grandes distancias, y que está dotado de unos sistemas tanto vanguardistas como peculiares para realizar su función. El buque en cuestión se conoce como “Heavy Lift Semisumergible”. A lo largo de este proyecto se aplicará el procedimiento típico de proyecto conceptual de un buque, conocido como “espiral de diseño,” a un tipo de embarcación algo distinto, que modificará algunos aspectos y obligará a adaptarlos a situaciones imprevistas.

Para llevar a cabo el diseño, y en base a observaciones empíricas de otros buques similares, se ha fijado una serie de valores o condiciones que permiten iniciar el procedimiento. Se ha considerado para ello el peso de la carga, conocido como peso muerto, y la distancia a cubrir navegando, dos de los factores relevantes que desde el inicio del proyecto han permanecido invariables.

Otros aspectos menos importantes, como la velocidad media de operación y la cantidad de pasajeros que debería llevar a bordo el buque, también se ha determinado desde el inicio del trabajo.

La metodología utilizada consiste en un proceso iterativo formado por una serie de apartados o estadios que conforman, en su totalidad, el proyecto de construcción del buque, y en la que cada nueva iteración se acerca se acerca más al resultado final modificando los valores iniciales.

Primeramente, se realiza un estudio de buques existentes para determinar las dimensiones básicas del proyecto, se sigue con el diseño de las formas, el dimensionamiento de la planta propulsora y la disposición general de los espacios interiores. Una vez llegados a este punto, se comprueba que no haya contradicciones de resultados y se procede a la parte más importante del proyecto, como es el cálculo de estabilidad y estructura en la que se han utilizado numerosas formulas y softwares para intentar ser los más precisos posible. Finalmente se realiza un cálculo de las líneas de carga del buque con todos los datos recopilados hasta el momento, su capacidad comercial (Arqueo) y se elaboran unas conclusiones.

Todos y cada uno de los apartados de estudio mencionados se han llevado a cabo siguiendo la normativa de la sociedad de clasificación del DNV (Det Norske Veritas), así como la normativa vigente internacional de la IMO (International Maritime Organisation) y el SOLAS (Safety Of Live At Sea).

---

# **Abstract**

The aim objective of this project is to design a ship big enough to transport offshore structures alongside the ocean, covering large distances and equipped with both, upbringing and interesting systems to do so. This kind of vessels are popularly known as heavy lift semisubmersible ships. To carry out this study a common methodology in a ship's design have been applied, it is Known as the "spiral design" system. Due to the special requirements of the vessel some aspects will be revised and modified to achieve a precise design.

To start developing this design some requirements have been established based on similar ships that are nowadays in operation. The most important are the weight of the cargo to be loaded and the sailing distance. Both aspects are fixed from the very beginning of the project.

The average velocity and the number of passengers on board are also fixed values.

The technique used along the design consists in an iterative process passing through different stages and phases which form part of the procedure of designing a vessel. In every new phase the results increase its accuracy and values previously obtained are modified.

Firstly, is necessary to establish general dimensions of the ship, to do so a market study has been carried out. This is followed by the design of the hull forms, the main propulsion system analysis and general arrangements. At this point is important to check that all the results are in good order.

Secondly, the most important part of the project is developed, it consists in the stability analysis and the structure calculations. To achieve the more accurate results there have been used different software's.

Finally, the load waterlines and the weight tonnage are calculated using all the results previously obtained. The last chapter of this project are the conclusions, where all results are displayed together.

All the above-mentioned stages will be done in accordance with the classification society DNV (Det Norske Veritas), also respecting IMO (International Maritime Organization) and SOLAS (Safety Of Live At Sea).

---

# **Tabla de contenidos**

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VIVI</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b>	<b>VII</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b>	<b>XVIVII</b>

---

## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**

<b>1.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO</b>	<b>2</b>
1.1.1 OBJETIVO	2
1.1.2 ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL PROYECTO	2
1.1.3 METODOLOGÍA	2
<b>1.2 LOS BUQUES SEMISUMERGIBLES</b>	<b>5</b>
<b>1.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA</b>	<b>6</b>
<b>1.4 TRANSPORTES SIGNIFICATIVOS</b>	<b>12</b>
<b>1.5 TIPOS DE HEAVY LIFT SEMISUMERGIBLES</b>	<b>12</b>
1.5.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN MÉTODO DE IZADO DE LA CARGA	13
1.5.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA CARGA A TRANSPORTAR	15
1.5.3 BUQUES RECONVERTIDOS	17
<b>1.6 PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA</b>	<b>19</b>
1.6.1 CONSIDERACIONES INICIALES	19
1.6.2 CARGA Y DESCARGA	19
1.6.3 ESTABILIDAD CRÍTICA	20

---

## **CAPÍTULO 2. DIMENSIONAMIENTO**

<b>2.1 BASE DE DATOS</b>	<b>24</b>
<b>2.2 OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES PRINCIPALES</b>	<b>26</b>
2.1.1 DETERMINACIÓN DE LA LOA	26
2.1.2 DETERMINACIÓN ESTADÍSTICA DEL RESTO DE ESLORAS	27
2.1.3 DETERMINACIÓN DE LA MANGA	28
2.1.4 DETERMINACIÓN DE LOS CALADOS	29
2.1.6 DETERMINACIÓN DEL RESTO DE LAS ALTURAS	30
2.1.7 OBTENCIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA	31
<b>2.3 OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES ADIMENSIONALES</b>	<b>34</b>
2.3.1 OBTENCIÓN DEL PESO EN ROSCA	34
2.3.2 OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES	38
<b>2.3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b>	<b>39</b>

---

<b>CAPÍTULO 3. FORMAS</b>	<b>41</b>
<b>3.1 PROCEDIMIENTO SEGUIDO</b>	<b>40</b>
<b>3.2 FORMAS INICIALES</b>	<b>41</b>
<b>3.3 PERFIL DE PROA</b>	<b>46</b>
<b>3.4 PERFIL DE POPA</b>	<b>46</b>
<b>3.5 APECTOS RELEVANTES</b>	<b>47</b>
<b>3.6 RESULTADOS FINALES</b>	<b>48</b>
<b>CAPÍTULO 4. PREDICCIÓN DE POTENCIA</b>	<b>51</b>
<b>4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL PROPULSOR Y CÁLCULOS DE POTENCIA</b>	<b>52</b>
4.1.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA	56
4.1.2 INCREMENTO DE LA RESISTENCIA POR TÚNELES TRANSVERSALES DE PROA	56
<b>4.2 SISTEMA PROPULSIVO</b>	<b>57</b>
4.2.1 TIPOS DE SISTEMAS PROPULSIVOS	57
4.2.2 JUSTIFICACIÓN DEL SISTEMA ESCOGIDO	58
4.2.3 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DIÉSEL-ELÉCTRICO CON PODS	60
4.2.4 FUNCIONAMIENTO Y ELEMENTOS DE LOS PODS.	62
<b>4.3 CÁLCULOS RELATIVOS A LA POTENCIA Y PROPULSIÓN</b>	<b>65</b>
4.3.1 CÁLCULO DE LOS RENDIMIENTOS	65
4.3.2 ELECCIÓN DEL PROPULSOR	69
<b>4.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LOS MOTORES</b>	<b>80</b>
<b>4.5 ELECCIÓN DE LAS HÉLICES SECUNDARIAS</b>	<b>82</b>
4.5.1 ELECCIÓN DE LOS GRUPOS GENERADORES	83
4.5.2 VERIFICACIÓN DEL BUEN COMPORTAMIENTO DE LA HÉLICE	83
<b>4.6 ELECCIÓN DE LOS GRUPOS GENERADORES</b>	<b>84</b>
<b>4.7 VERIFICACIÓN DEL BUEN COMPORTAMIENTO DE LA HÉLICE</b>	<b>85</b>
<b>CAPÍTULO 5. DISPOSICIÓN GENERAL</b>	<b>87</b>
<b>5.1 CONSIDERACIONES INICIALES</b>	<b>88</b>
<b>5.2 ELEMENTOS ESTRUCTURALES</b>	<b>89</b>
5.2.1 CLARA ENTRE CUADERNAS	89
5.2.2 MAMPAROS ESTANCOS TRANSVERSALES	89
5.2.3 MAMPAROS ESTANCOS LONGITUDINALES	92
5.2.4 DISPOSICIÓN DE LAS CUBIERTAS	93
<b>5.3 DISPOSICIÓN DE LOS ESPACIOS</b>	<b>97</b>
5.3.1 CÁMARA DE MÁQUINAS	97
5.3.2 PROPULSORES PRINCIPALES Y SALAS DE CONTROL	99
5.3.3 HELICES TRANSVEERSALES DE PROA	99
5.3.4 AMMARE Y FONDEO	100
5.3.5 HABILITACIÓN	100

---

5.3.6 CASINGS DE POPA	101
5.3.7 PUENTE DE MANDO	103
5.3.8 ÁREA DE CARGA Y TRABAJO	103
5.3.9 TÚNEL DE PASAJE	103
<b>5.4 VOLÚMENES DE LOS TANQUES</b>	<b>105</b>
5.4.1 TANQUES DE COMBUSTIBLE	106
5.4.2 TANQUES DE SERVICIO	107
5.4.3 TANQUES DE LASTRE	111
 <b>CAPÍTULO 6. ESTIMACIÓN DE LOS PESOS</b>	 <b>120</b>
 <b>6.1 ACERO CONTINUO</b>	 <b><a href="#">121</a></b>
<b>6.2 PESO DE LOS PODS DE POPA</b>	<b>122</b>
6.2.1 PESO DE LA HÉLICE	123
6.2.2 PESO DEL MOTOR	124
<b>6.3 PESOS COMPLEMENTARIOS</b>	<b>124</b>
<b>6.4 REPARTO DE LOS PESOS</b>	<b>126</b>
 <b>CAPÍTULO 7. ESTABILIDAD</b>	 <b>128</b>
 <b>7.1 CARGAS TÍPICAS DE TRANSPORTE</b>	 <b>129</b>
7.1.1 TRANSPORTE DE UN MÓDULO GRÚAS	130
7.1.2 TRANSPORTE DE UNA PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE	131
<b>7.2 CONDICIONES DE CARGA</b>	<b>133</b>
<b>7.3 CRITERIOS DE ESTABILIDAD</b>	<b>136</b>
7.3.1 CRITERIOS DE ESTABILIDAD EN NAVEGACIÓN	137
7.3.2 ESTABILIDAD EN AVERÍA	137
<b>7.4 HIDROESTÁTICAS DEL BUQUE</b>	<b>138</b>
7.4.1 VALORES HIDROESTÁTICOS EN LOS CALADOS REPRESENTATIVOS	140
7.4.2 CURVAS DE ÁREAS EN DISTINTOS CALADOS REPRESENTATIVOS	140
<b>7.5 CÁLCULOS DE ESTABILIDAD</b>	<b>142</b>
7.5.1 CONSIDERACIONES	142
7.5.2 CALADO MÍNIMO	144
7.5.3 SALIDA DE PUERTO CON LASTRE	145
7.5.4 LLEGADA A PUERTO CON LASTRE	146
7.5.5 SALIDA DE PUERTO CON MÓDULO DE GRÚAS	147
7.5.6 LLEGADA A PUERTO CON MÓDULO DE GRÚAS	148
7.5.7 SALIDA DE PUERTO CON FPSO	149
7.5.8 LLEGADA A PUERTO CON FPSO	150
7.5.9 CALADO AL PUNTAL DEL BUQUE CON LASTRE	151
7.5.10 CALADO AL PUNTAL DEL BUQUE CON CARGA	152
7.5.11 CALADO MÁXIMO SUMERGIDO	154
<b>7.6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>157</b>

---



---

<b>7.7 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN AVERÍA</b>	<b>160</b>
7.7.1 ESTABILIDAD EN AVERÍA DURANTE LA NAVEGACIÓN	160
7.7.2 ESTABILIDAD EN AVERÍA DURANTE OPERACIONES	163
<b>7.8 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE ESTABILIDAD EN AVERÍA</b>	<b>179</b>
<b>CAPÍTULO 8. RESISTENCIA ESTRUCTURAL</b>	<b>181</b>
<b>8.1 TIPO DE ESTRUCTURA</b>	<b>182</b>
<b>8.2 MATERIAL</b>	<b>183</b>
<b>8.3 DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES</b>	<b>184</b>
<b>8.4 MOMENTOS FLECTORES</b>	<b>184</b>
8.4.1 MOMENTOS FLECTORES EN AGUAS TRANQUILAS	185
8.4.2 MOMENTOS FLECTORES EN AGUAS CON OLAS	185
<b>8.5 CORTANTES</b>	<b>186</b>
8.5.1 CORTANTES EN AGUAS CON OLAS	185
8.5.2 CORTANTES EN AGUAS CON OLAS	187
<b>8.6 MOMENTOS Y CORTANTES ANALIZADOS CON MAXSURF</b>	<b>188</b>
<b>8.7 PRESIONES DE DISEÑO</b>	<b>193</b>
8.7.1 PRESIÓN EN EL FONDO	195
8.7.2 PRESIÓN EN EL DOBLE FONDO	196
8.7.3 PRESIÓN EN LOS COSTADOS	197
8.7.4 PRESIÓN EN LAS CUBIERTAS	198
8.7.5 PRESIÓN EN LOS MAMPAROS	200
<b>8.8 ESCANTILLONADO DE LAS PLANCHAS</b>	<b>200</b>
8.8.1 FONDO	200
8.8.2 COSTADO	203
8.8.3 CUBIERTAS	205
8.8.4 MAMPAROS	207
<b>8.9 ESTRUCTURAS TRANSVERSALES</b>	<b>208</b>
<b>8.10 ELECCIÓN DE PERFILES</b>	<b>211</b>
<b>8.11 COMPROBACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LA CUADERNA MAESTRA</b>	<b>213</b>
<b>CAPÍTULO 9. FRANCOBORDO Y ARQUEO</b>	<b>218</b>
<b>9.1 FRANCOBORDO</b>	<b>219</b>
9.1.1 CONSIDERACIONES	220
9.1.2 FRANCOBORDO TABULAR Y CORRECCIONES	221
9.1.3 FRANCOBORDOS MÍNIMOS	224
9.1.3 ALTURA MÍNIMA DE PROA	225
<b>9.2 ARQUEO</b>	<b>227</b>
9.2.1 CONSIDERACIONES	227
9.2.2 ARQUEO BRUTO	228
9.2.3 ARQUEO NETO	227

---

<b>CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES</b>	<b>230</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>234</b>
<b>ANEXO 1. BASE DE DATOS AMPLIADA</b>	<b>239</b>
<b>ANEXO 2. BUQUE CON Y SIN BULBO DE PROA</b>	<b>241</b>
<b>ANEXO 3. CÁLCULOS DE ESTABILIDAD</b>	<b>244</b>
<b>ANEXO 4. CÁLCULOS DE ESTABILIDAD EN AVERÍA</b>	<b>267</b>
<b>ANEXO 5. PLANO DE FORMAS</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.280</b>
<b>ANEXO 6. PLANO DE DISPOSICIÓN GENERAL</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.281</b>
<b>ANEXO 7. PLANO DE LA CUADERNA MAESTRA</b>	<b>282</b>

---

# **Listado de Figuras**

Figura 1, proceso seguido en la creación de un nuevo buque .....	3
Figura 2, carguero de alta mar .....	5
Figura 3, MV Lichtenfels[7].....	6
Figura 4, Blue Water rig number 1 [7].....	7
Figura 5, Dock Lift I [7].....	7
Figura 6, modelo 3D de la Ocean II [12] .....	8
Figura 7, petroleros panamax reconvertidos [9].....	9
Figura 8, el Blue Marlin transportando una FPSO[7] .....	10
Figura 9, proceso de carga [9] .....	11
Figura 10, transporte de un módulo de grúas [13] .....	11
Figura 11, Dockwise Vanguard [7].....	12
Figura 12, método de izado de carga mediante grúas. [19] .....	14
Figura 13, buque semisumergible cargando un FPSO [20] .....	15
Figura 14, carga deslizándose sobre cubierta del buque [21].....	15
Figura 15, buque dique Rolldock [16] .....	17
Figura 16, buque especial para transporte de yates [10].....	18
Figura 17, antiguo petrolero reconvertido en semisumergible [14] .....	18
Figura 18, fases de la operación de carga normalizada [10].....	21
Figura 19, estabilidad transversal en el proceso de emersión [10] .....	22
Figura 20, regresión línea entre DWT y $LOA^3$ .....	27
Figura 21, relación entre longitud de cubierta y área .....	29
Figura 22, relación área con la manga.....	30
Figura 23, relación para obtención del calado .....	31
Figura 24, relación entre calado y puntal.....	31
Figura 25, relación del peso muerto y la potencia .....	32
Figura 26, explicación gráfica del $C_b$ .....	33
Figura 27, correcciones aplicables al peso del acero .....	35
Figura 28, modelo de partida .....	42
Figura 29, alzado, perfil y planta del buque de partida.....	43

---

Figura 30, ventana de transformaciones paramétricas de <i>maxsurf</i> .....	44
Figura 31, formas obtenidas tras los primeros cambios .....	45
Figura 32, buque Mighty Servant, sin bulbo de proa .....	46
Figura 33, reservas de flotabilidad de popa .....	47
Figura 34, modificación de la eslora de cubierta de carga .....	48
Figura 35, formas finales del buque proyecto.....	48
Figura 36, curva de áreas final obtenida .....	49
Figura 37, curva de áreas inicial del modelo de <i>maxsurf</i> .....	50
Figura 38, las distintas opciones de análisis de resistencia.....	53
Figura 39, incremento de resistencia en función de la velocidad .....	56
Figura 40, esquema típico de propulsión diésel.....	58
Figura 41, esquema propulsivo diésel-eléctrico.....	58
Figura 42, sistema completo integrado en el buque.....	60
Figura 43, sistema integrado con PODS .....	61
Figura 44, esquema típico de un POD .....	63
Figura 45, motor síncrono fueraborda .....	63
Figura 46, sistema de refrigeración .....	64
Figura 47, control de los PODS desde el puente de mando .....	64
Figura 48, rendimientos aplicables al sistema de propulsión tradicional. ....	65
Figura 49, variante CO .....	72
Figura 50, variante DO.....	72
Figura 51, variante VI, para rompehielos .....	73
Figura 52, Azipods de última generación de amplias aplicaciones .....	73
Figura 53, potencia entregada en función de las revoluciones.....	74
Figura 54, potencia-revoluciones de la variante XO .....	75
Figura 55, huelgos en la popa con la hélice escogida.....	77
Figura 56, series B de Wageningen .....	79
Figura 57, propulsor transversal de proa wartsila [42] .....	83
Figura 58, motor Wartsila 9L26 [42].....	84
Figura 59, motor auxiliar Wartsila 6L26 [42].....	85
Figura 60, ruta de Singapur a Mar del Norte.....	88
Figura 61, disposición de mamparos longitudinales y transversales .....	92

---

Figura 62, disposición de las cubiertas en proa .....	95
Figura 63, disposición de las cubiertas de la superestructura .....	96
Figura 64, sala de máquinas a proa .....	97
Figura 65, a la izquierda el nivel inferior. A la derecha el nivel superior de la CM. ....	98
Figura 66, locales de propulsión y PODS de popa .....	99
Figura 67, cubiertas de habitación y puente de mando .....	101
Figura 68, casings de popa, con aparejos de amarre y fondeo al tope .....	102
Figura 69, túnel de pasaje justo debajo de la cubierta de carga que comunica proa y popa .....	104
Figura 70, disposición general de los espacios .....	104
Figura 73, bombas Azcue de lastre seleccionadas .....	126
Figura 71, transporte de un módulo de grúas .....	131
Figura 72, transporte de una FPSO .....	132
Figura 74, curva de áreas con un calado de 7.9 m .....	140
Figura 75, curva de áreas con un calado de 9.2 m .....	140
Figura 76, curva de áreas con un calado de 12.5 m .....	141
Figura 77, curva de áreas con un calado de 21.8 m .....	141
Figura 78, brazo adrizante obtenido .....	144
Figura 79, brazo adrizante obtenido .....	144
Figura 80, brazo adrizante obtenido .....	145
Figura 81, brazo adrizante obtenido .....	146
Figura 82, brazo adrizante obtenido .....	147
Figura 83, brazo adrizante obtenido .....	148
Figura 84, brazo adrizante obtenido .....	149
Figura 85, brazo adrizante obtenido .....	150
Figura 86, brazo adrizante obtenido .....	151
Figura 87, brazo adrizante obtenido .....	152
Figura 88, brazo adrizante obtenido .....	153
Figura 89, modelo de <i>maxsurf</i> con una FPSO .....	154
Figura 90, brazo adrizante obtenido .....	155
Figura 91, brazo adrizante obtenido .....	156
Figura 92, brazo adrizante obtenido .....	157
Figura 93, ventana del programa para establecer parámetros básicos .....	161

---

Figura 94, división del buque en zonas .....	162
Figura 95, avería en el castillo de proa .....	163
Figura 96, avería en casings de estribor .....	164
Figura 97, avería en la sala de máquinas.....	164
Figura 98, brazo adrizante obtenido .....	165
Figura 99, curva de áreas obtenida .....	166
Figura 100, brazo adrizante obtenido .....	167
Figura 101, brazo adrizante obtenido .....	168
Figura 102, brazo adrizante obtenido .....	170
Figura 103, brazo adrizante obtenido .....	171
Figura 104, brazo adrizante obtenido .....	172
Figura 105, brazo adrizante obtenido .....	173
Figura 106, brazo adrizante obtenido .....	174
Figura 107, brazo adrizante obtenido .....	175
Figura 108, brazo adrizante obtenido .....	176
Figura 109, brazo adrizante obtenido .....	177
Figura 110, criterios de cumplimiento .....	178
Figura 111, momentos flectores y cortantes resultantes .....	190
Figura 112, perfil de llanta con bulbo de uso naval .....	211
Figura 113, disco Plimsoll .....	219
Figura 114, tabla de francobordos tabulares de DNV .....	221
Figura 115, reducción por superestructuras .....	223

---

# **Listado de Tablas**

Tabla 1, transportes famosos hecho por buques semisumergibles.....	13
Tabla 2, base de datos filtrada .....	25
Tabla 3, relación entre esloras .....	28
Tabla 4, datos del buque Blue Marlin .....	35
Tabla 5, resumen de los datos del capítulo.....	39
Tabla 6, coeficientes adimensionales obtenidos .....	39
Tabla 7, datos iniciales del buque del programa.....	44
Tabla 8, requerimientos de instalación de bulbo de proa .....	46
Tabla 9, comparación de datos finales e iniciales .....	49
Tabla 10, criterios de uso del método Holtrop i Mennen .....	54
Tabla 11, valores de resistencia y EHP según la velocidad de avance .....	55
Tabla 12, rendimientos iniciales tomados.....	70
Tabla 13, características de la hélice .....	76
Tabla 14, relación área de las palas con la del círculo formado por el diámetro para 3 y 4 palas .....	78
Tabla 15, rangos de validez para las series B .....	78
Tabla 16, resultados obtenidos de las series B .....	80
Tabla 17, datos de las hélices de proa.....	82
Tabla 18, datos de los motores principales.....	83
Tabla 19, datos de los motores auxiliares .....	84
Tabla 20, resultados de cavitación para las velocidades de operación del buque .....	86
Tabla 21, resultados obtenidos del software NavCad.....	86
Tabla 22, disposición de los mamparos transversales .....	91
Tabla 23, disposición de mamparos longitudinales .....	92
Tabla 24, situación y capacidad de tanques de combustible .....	106
Tabla 25, situación de tanques de desperdicios .....	110
Tabla 26, consumos de agua dulce .....	110
Tabla 27, disposición de los tanques de agua dulce .....	111
Tabla 28, disposición final de tanques de lastre .....	119
Tabla 29, pesos de las distintas cubiertas .....	121

---

Tabla 30, posición del CG de las estructuras.....	122
Tabla 31, distribución del peso del acero continuo .....	123
Tabla 32, peso para los distintos diámetros.....	124
Tabla 33, datos de volumen y peso de los PODS XO .....	124
Tabla 34, peso total del propulsor .....	125
Tabla 35, situación de los pesos puntuales .....	126
Tabla 36, resto de pesos repartidos .....	127
Tabla 37, datos del módulo de grúas .....	130
Tabla 38, datos de una FPSO .....	132
Tabla 39, valores hidrostáticos a los distintos calados .....	139
Tabla 40, criterios de cumplimiento.....	144
Tabla 41, criterios de cumplimiento.....	145
Tabla 42, criterios de cumplimiento.....	146
Tabla 43, criterios de cumplimiento.....	147
Tabla 44, criterios de cumplimiento.....	148
Tabla 45, criterios de cumplimiento.....	149
Tabla 46, criterios de cumplimiento.....	150
Tabla 47, criterios de cumplimiento.....	151
Tabla 48, criterios de cumplimiento.....	152
Tabla 49, criterios de cumplimiento.....	153
Tabla 50, criterios de cumplimiento.....	155
Tabla 51, criterios de cumplimiento.....	157
Tabla 52, criterios de cumplimiento.....	158
Tabla 53, criterios de cumplimiento.....	162
Tabla 54, datos de equilibrio hidrostático obtenido .....	165
Tabla 55, criterio de cumplimiento .....	166
Tabla 56, datos de equilibrio hidrostático obtenido .....	167
Tabla 57, criterio de cumplimiento .....	168
Tabla 58, criterio de cumplimiento .....	169
Tabla 59, datos hidrostáticos .....	169
Tabla 60, criterios de cumplimiento.....	170
Tabla 61, datos de equilibrio hidrostático obtenido .....	171



---

Tabla 62, criterio de cumplimiento .....	172
Tabla 63, criterio de cumplimiento .....	173
Tabla 64, criterio de cumplimiento .....	174
Tabla 65, criterio de cumplimiento .....	174
Tabla 66, datos de equilibrio hidrostático obtenido .....	175
Tabla 67, criterio de cumplimiento .....	176
Tabla 68, criterio de cumplimiento .....	177
Tabla 69, datos representativos en ambos calados .....	182
Tabla 70, resultados de momentos flectores.....	186
Tabla 71, resultados de cortantes .....	187
Tabla 72, pesos repartidos .....	189
Tabla 73, valores de esfuerzos obtenidos .....	191
Tabla 74, perfiles utilizados en cada zona del buque.....	211
Tabla 75, espesores escogidos .....	212
Tabla 76, tabla resume de las inercias proporcionadas por cada elemento.....	217
Tabla 77, dimensiones para el cálculo de francobordo .....	221
Tabla 78, francobordo tabular obtenido por interpolación .....	222
Tabla 79, tabla de arrufos normales .....	224
Tabla 80, resultados de francobordo .....	226
Tabla 81, características finales del buque .....	230
Tabla 82, equilibrio hidrostático al calado mínimo .....	245
Tabla 83, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante .....	245
Tabla 84, valores hidrostáticos al calado de diseño.....	247
Tabla 85, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	247
Tabla 86, valores hidrostáticos obtenidos .....	249
Tabla 87, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	249
Tabla 88, valores hidrostáticos obtenidos .....	251
Tabla 89, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante .....	251
Tabla 90, valores hidrostáticos obtenidos .....	253
Tabla 91, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	253
Tabla 92, valores hidrostáticos obtenidos .....	255
Tabla 93, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	255

---

Tabla 94, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	256
Tabla 95, valores hidrostáticos obtenidos .....	258
Tabla 96, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	258
Tabla 97, valores hidrostáticos obtenidos .....	260
Tabla 98, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	260
Tabla 99, valores hidrostáticos obtenidos .....	262
Tabla 100, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	262
Tabla 101, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	263
Tabla 102, valores hidrostáticos obtenidos .....	265
Tabla 103, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	265
Tabla 104,, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	266
Tabla 105, valores hidrostáticos obtenidos .....	268
Tabla 106, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	268
Tabla 107, valores hidrostáticos obtenidos .....	269
Tabla 108, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	270
Tabla 109, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	271
Tabla 110, valores hidrostáticos obtenido .....	273
Tabla 111, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	273
Tabla 112, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	274
Tabla 113, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	275
Tabla 114, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	276
Tabla 115, valores hidrostáticos obtenidos .....	278
Tabla 116, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	278
Tabla 117, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.....	279

# Capítulo 1. Antecedentes

El objetivo final de este proyecto consiste en realizar el diseño preliminar de un buque Heavy Lift semisumergible. Este tipo de embarcaciones se destina al transporte de cargas muy pesadas y de geometrías muy diversas a grandes distancias. En el capítulo a continuación se contextualizará de qué tipo de buque se trata, cuáles son sus semejantes, las cargas que puede transportar y la evolución histórica que se ha seguido hasta llegar a la actualidad.

Se detallará también el procedimiento y las herramientas utilizadas para llevar a cabo todas las etapas pertinentes del proyecto.

Se ha diseñado el buque de acuerdo con la normativa internacional vigente como son el SOLAS [1], MARPOL [2], el convenio internacional de las líneas de carga [3]; en concreto se ha regido por la sociedad de clasificación DNV (Det Norske Veritas) [5].

## **1.1 Características del proyecto**

### **1.1.1 Objetivo**

Se pretende hacer el diseño preliminar de un buque semisumergible de cubierta abierta, que tenga capacidad para embarcar la carga por el método FLO-FLO, en el que el buque se sumerge por debajo de la cubierta de carga e intemperie.

Para todos los cálculos y las consideraciones tomadas en adelante, se han hecho de acuerdo con la normativa anteriormente citada [1][2][3][4].

### **1.1.2 Especificaciones técnicas del proyecto**

**Tipo de buque:** Heavy Lift semi-sumergible

**Peso muerto:** 40000 tm

**Tripulación:** 25 Pasajeros

**Autonomía:** 15000 mn

**Carga máxima en cubierta:** 20t/m<sup>2</sup>

**Sociedad de clasificación:** DNV GL

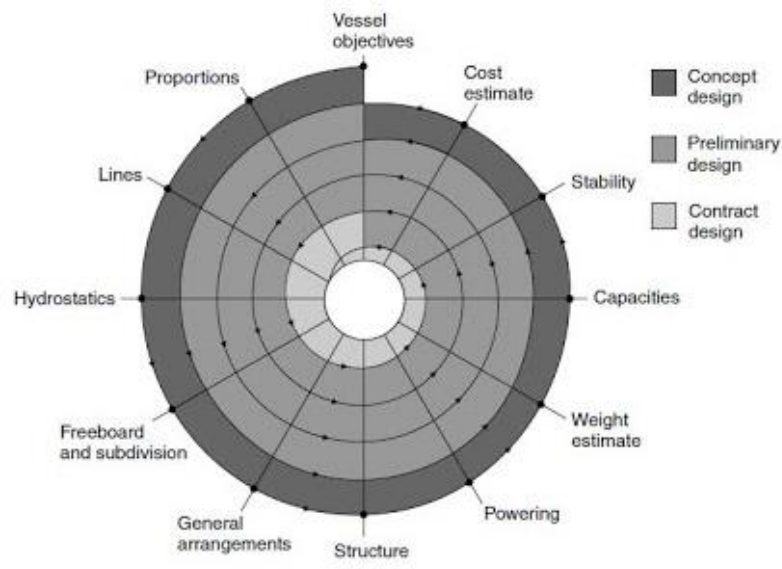
**Velocidad:** 13 Kn

### **1.1.3 Metodología**

El proyecto de diseño de un buque es un proceso que consta de diferentes apartados, entre ellos relacionados y que se afectan directamente. Es por ello por lo que las distintas etapas del proyecto deben estar bien definidas, usando un método que permita mantener un orden.

La espiral de diseño representa un proceso, cíclico e iterativo, donde quedan representadas las distintas etapas de diseño.

Las diferentes etapas por las que se deberá pasar el proyecto preliminar son las que siguen:



**Figura 1, proceso seguido en la creación de un nuevo buque**

Partiendo de unas especificaciones impuestas por el armador, se pasa por todas y cada una de las etapas hasta completar un ciclo. Esta primera vuelta a la espiral corresponde al anteproyecto, es entonces cuando se inicia sucesivos ciclos, hasta llegar a los requisitos que se estipulan en el contrato del buque.

### **Dimensionamiento del buque**

En este apartado es necesario disponer de una base de datos de buques similares para poder establecer una relación entre los existentes y el objetivo de proyecto. En esta primera fase el objetivo es determinar las dimensiones principales del buque mediante regresiones lineales hechas a partir de la base de datos ya mencionada.

### **Formas**

Mediante el uso del programa *Maxsurf Modeler* y las dimensiones obtenidas en el anterior apartado se podrán obtener unas formas aproximadas del casco. Es importante que el diseño este en concordancia con las especificaciones del proyecto. Viéndose especialmente afectadas por la velocidad de operación seleccionada y los espacios internos del buque.

### **Dimensionamiento del propulsor**

En este apartado el objetivo es dimensionar el motor principal y las hélices necesarias para que el buque pueda alcanzar la velocidad especificada. Gracias a las formas obtenidas en el apartado anterior se puede estimar la resistencia al avance del buque y por tanto la potencia requerida.

### **Diseño del sistema de gobierno y maniobrabilidad**

En esta etapa hay que calcular las dimensiones del timón y de la mecha del mismo para cumplir con unos requisitos impuestos por la normativa internacional y por la sociedad de clasificación bajo la cual se desarrolle el diseño del buque.

### **Disposición general**

El objetivo es diseñar y distribuir el volumen interior del casco en los diferentes espacios necesarios para la operación del buque. Tales como espacio de máquinas, tanques, espacios de seguridad, acomodación para pasaje, ente otros.

### **Estabilidad y comportamiento en la mar**

Gracias al programa *maxsurf stability* se pueden analizar los diferentes comportamientos de estabilidad y del buque dependiendo del estado de navegación en el que se encuentre. Además, se deberá tener en cuenta los requisitos impuestos por la IMO [6]. Es importante recalcar, que, en el caso de buque a diseñar, se deberá analizar también la estabilidad en operaciones de cara, descarga y en avería.

### **Resistencia estructural**

La resistencia estructural de un buque es muy importante para que éste pueda soportar todos los esfuerzos a los que debe someterse la estructura en servicio. En este apartado, y para no entrar demasiado en detalles estructurales, solo se dimensiona los refuerzos y espesores necesarios de la cuaderna maestra, que es el elemento estructural más importante del buque. Será necesario contrastar en todo momento con los requisitos de seguridad impuestos por la normativa.

## Francobordo y arqueo

El arque y el francobordo de diseño vienen dados por la IMO [6]. Se deberá tener en cuenta que el francobordo de buque a diseñar es variable debido a sus métodos de carga y descarga.

## 1.2 Los buques semisumergibles

Los buques Heavy Lift Semisumergibles pertenecen a la categoría de buques Heavy Lift Carrier, que a su vez pertenecen a la categoría de buques conocidos como OSV (Offshore vessels). Este tipo de embarcaciones son utilizadas para apoyo en alta mar. Una de sus principales características es que son técnicamente muy avanzadas y especializadas en funciones como extinción de incendios, suministros, amarre y fondeo, mantenimiento, transporte...

La categoría de los buques heavy Lift, como su nombre indica, son embarcaciones con una capacidad de carga muy elevada, así como también su autonomía.



Figura 2, carguero de alta mar

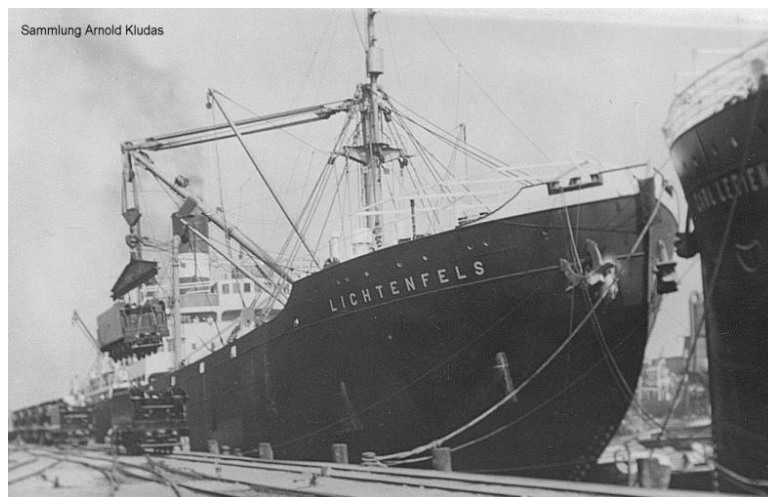
Están dotados de una cubierta de carga despejada y de grandes grúas que sirven para la carga y descarga de la misma.

Los buques Heavy Lift Semisumergibles surgen de la necesidad de transportar grandes estructuras flotantes a largas distancias. Tienen la capacidad de sumergir su cubierta de carga lastrando el buque, de modo que puede embarcar objetos flotantes sin necesidad de medios auxiliares, como podrían ser grúas o raíles.

### 1.3 Evolución histórica

Antiguamente este tipo de buques se llamaban Lift Carriers, y su función era el transporte de cargas bastante pesadas mediante un sistema de remolcadores de altura. El límite de la carga a transportar se veía frenado por los diseños del momento de buques, más pequeños que los actuales y a los medios de izada existentes de la carga. Con dichos remolcadores la navegación era lenta y peligrosa a causa de las malas condiciones de estiba, la mala mar, las condiciones de viento y las corrientes.

En los años 20, y con la finalidad de satisfacer la demanda de transporte de trenes ensamblados hacia la India británica, la naviera DDG Hansa llevó a cabo un proyecto que hoy se conoce como MV Lichtenfels, y es considerado el primer buque Heavy Lift del mundo.

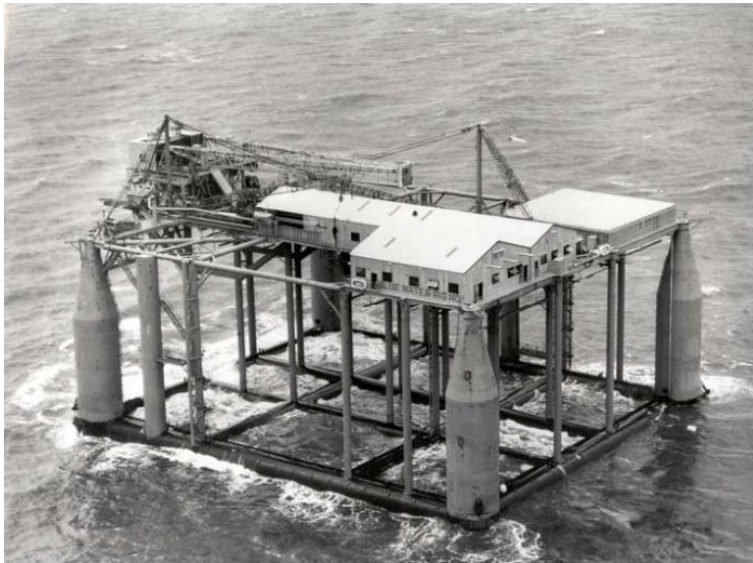


**Figura 3, MV Lichtenfels[7]**

En la década de los 60 se empezaron a construir las primeras plataformas semisumergibles, debido principalmente al aumento de la demanda de la extracción de petróleo, fuente de energía que hasta el día de hoy ha constituido el mayor aliciente para el desarrollo y fabricación de los Heavy Lift.

En la imagen a continuación se muestra la primera plataforma semisumergible construida, que se destinó a la extracción de petróleo en el Golfo de México.





**Figura 4, Blue Water rig number 1 [7]**

De la unión de los dos conceptos expuestos, en 1972 surge el “Docklift 1”, que se consideró como el primer semisumergible de todos los tiempos y podía cambiar su calado para facilitar el embarque de mercancías. Debido a los límites de izada de las grúas de carga su capacidad era limitada.



**Figura 5, Dock Lift I [7]**

Más adelante en 1976 se construyeron dos gabarras semisumergibles, las “Ocean Servant I y II”. Estos dispositivos no disponían de potencia propulsora por lo que debían ser arrastradas por remolcadores de alta potencia, toda su instalación propulsora se reducía a unos pequeños propulsores para facilitar la maniobrabilidad. Su funcionamiento consistía en unos bastidores flotantes en cada una de las esquinas para garantizar estabilidad y flotabilidad sin necesidad de apoyarse en el fondo marino, de modo que se podía situar la plataforma por debajo de la carga e izarla desde abajo.



**Figura 6, modelo 3D de la Ocean II [12]**

El siguiente paso evidente fue disponer las barcasas de remolcadores semisumergibles de sistemas de propulsión y gobierno propio, pudiendo eliminar definitivamente los buques remolcadores, aumentando también la fiabilidad y la seguridad de la carga a transportar. Estos primeros OSV utilizaban bombas impulsadas por compresores de aire para lastrar y deslastrar unos tanques, que permitían una variación de calada de hasta 15m. En 1979 se construyeron los buques superservant 1 y 2, que contaban con una capacidad de transporte de hasta 15000 tpm.

A partir de los años ochenta se optó por la conversión de petroleros de clase Panamax en semisumergibles, una alternativa económicamente más rentable. En 1982 se convirtieron dos petroleros panamax, el “Sibig Venture” y el “Ferncarrier”.

Algunas características distintas de los anteriores eran las siguientes:

- El propio casco hacía la función de las torretas estabilizadoras.
- La parte central de la carena era retirada y reemplazada por una cubierta de carga más corta y con menor puntal. De este modo la cubierta quedaba libre por los costados y solo se veía limitada por las superestructuras de proa y popa.
- Se caracterizaban por tener un bulbo de proa mucho más exagerado que cualquiera construido hasta la fecha.

En la imagen que sigue, se puede observar como a la parte central de la eslora se la ha practicado una “rebanada” para hacer una cubierta corrida.



**Figura 7, petroleros panamax reconvertidos [9]**

El “Transshelf” fue un buque construido en 1987 que fue el más grande reconvertido hasta el momento basándose en la tecnología de la época.

A pesar de la tendencia de convertir antiguos petroleros, también se construían Semisumergibles como proyectos nuevos. Concretamente en 1983 se construyeron tres “Mighty Servants”, centrados en los superservant, que tenían incluso más capacidad de carga que la que se demandaba en el mundo offshore en ese momento (hasta 27000 t). Esta nueva clase de buques demostraba muchas mejoras respecto lo visto hasta el momento, una de ellas era la capacidad de remover las torretas de flotabilidad de popa para dar cabida a cargas con geometrías diversas.

La generación actual de buques semisumergibles empezó su construcción en la década de los 90, cuando dos empresas navieras importantes se fusionaron (Wijismuller Transport y la Dock Express Shipping), formando la naviera líder en diseño y construcción de este tipo de buques hasta el día de hoy, La dockwise Shipping. Este tipo de buques semisumergibles constan de una cubierta abierta y capacidad de operar con dicha cubierta sumergida, haciendo relativamente fácil la carga y descarga de estructuras muy pesadas.

En el año 2000 se construyeron para el mercado los gemelos Black Marlin y blue marlín, propiedad de Offshore heavy Transport de Oslo, pero que en 2001 pasaría a formar parte de la Dockwise.



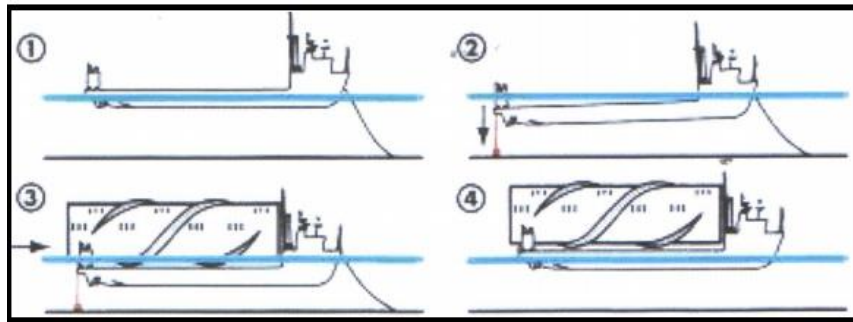
**Figura 8, el Blue Marlin transportando una FPSO<sup>1</sup>[7]**

La evolución de estos buques tiende a aumentar la obra viva, generalmente mediante un aumento considerable de la manga y ligeras modificaciones en sus formas con tal de permitir levantar más peso. Concretamente en 2001 el Mighty Servant 1 fue retirado y modificado, aumentando su manga 10 metros y su calado de inmersión hasta los 14 metros. Posteriormente en 2004 se practicó una operación similar con el Blue Marlin y se le aumento la manga de 42 m hasta los 63 m [7].

Para lograr completar el proceso de inmersión y posterior izado de la carga se dota al buque de unos intrincados sistemas de lastrado y deslastrado de tanques situados a lo largo de su estructura que permiten la operación. Aunque se trata de un sistema muy complejo y extremadamente planificado y cuidado, en la siguiente figura se puede observar, de forma muy simplificada, el proceso que sigue un semisumergible cualquiera al recoger una carga flotante de la superficie del agua.

---

<sup>1</sup> Una FPSO es una plataforma flotante de producción, descarga y almacenamiento de combustibles y recursos obtenidos en alta mar.



**Figura 9, proceso de carga [9]**

En los inicios del siglo XXI, el aumento de las prospecciones petrolíferas y el aumento del precio del petróleo causó un aumento de la demanda de buques especializados, surgiendo nuevas empresas que hicieron competencia a las existentes.

En el 2002 inicia su andadura en este negocio marítimo la compañía china Cosco Shipping Co., Ltd (Coscol) con los buques “Tai An Kou” y su gemelo “Kang Sheng Kou” que siguieron el diseño estructural de los buques de cubierta abierta, pero más pequeños.

En noviembre de 2007, Coscol ordenó la construcción de dos nuevos buques en Guangzhou Shipyard International de China, en concreto los gemelos “Xiang Yun Kou” y “Xiang Rui Kou” con 217 metros de eslora, 43 metros de manga, 48.231 toneladas de peso muerto, pudiendo sumergir su cubierta de carga 13 metros bajo la superficie de la mar.



**Figura 10, transporte de un módulo de grúas [13]**

En la actualidad, el buque heavy lift semisumergible más imponente del mercado es propiedad de la empresa Dockwise y su nombre es Dockwise Vanguard, construido en Hyundai heavy industries.



Tiene una eslora de 275 m, una manga de 70 m y peso muerto de 110000 toneladas. Una de sus peculiaridades es que rompe con la estética hasta la fecha de esta clase de buques, eliminando el castillo de proa y situando el puente y los camarotes en uno de los costados del buque. De este modo se permite embarcar mercancía reflatada y rodada (tanto por proa como por popa) [14].



**Figura 11, Dockwise Vanguard [7]**

El nuevo transporte de estructuras altamente pesadas no se limita solamente a las plataformas de extracción de petróleo (oilrigs), sino también al transporte de grandes buques, instalaciones de energías renovables, módulos de grúas (topsides), piezas para grandes construcciones (FPSO) tanto onshore como offshore, entre otras.

## **1.4 Transportes significativos**

Es importante tener en cuenta que cada uno de los transportes explicados se han tenido que enfrentar a distintos problemas; condiciones de mar, puertos de entrada y salida, dimensiones de la carga (pudiendo salir estas por los costados o popa), centros de gravedad, condiciones de estiba, superficie velica, formas de distintas de carga... Este tipo de inconvenientes son los que hacen que las operaciones que realizan cada uno de estos buques sean únicas, y que cada proyecto tenga un grado de estudio y desarrollo mucho más costoso y largo que el de cualquier otro transporte de cargas pesadas larga distancia. [11]21

TPM	Buque	Distancia	Carga	Año
40000	Mighty Servant 1	China-Brasil	Sevan Brasil (FPSO)	2012
65000	Dockwise Vanguard	Corea-Noruega	Golliat(FPSO)	2015
8300	Fjell	Vietnam-India	Heera HRD (topside)	2014
59500	Blue Marlin	Corea-Texas	Thunderhorse (oilrig semisubmergible)	2005
45000	Blue Marlin	Texas-Alaska	Sea-based X-Band (radar)	2012
27000	Blue Marlin	Ferrol-Australia	HMAS Canberra (buque)	2011
41165	Xin Guang Hua	Corea-Texas	Appomatox (oilrig)	2017

**Tabla 1, transportes famosos hecho por buques semisumergibles**

## 1.5 Tipos de Heavy Lift Semisumergibles

Dentro de los buques Semisumergibles podemos distinguir entre distintos tipos en función del origen de construcción, los métodos de izado de la carga y del tipo de carga. [8]

### 1.5.1 Clasificación según método de izado de la carga

#### 1.5.1.1 La carga rodada (ROLL ON-ROLL OFF)

Se produce el embarque la de la carga por popa, gracias a unos tráileres que se desplazan por encima de unos ejes. Los tráileres pueden ser autopropulsados o remolcados, dependiendo del buque y de la carga que deba transportar.

Es importante la correcta distribución de la carga, para garantizar la misma cantidad de esfuerzos en las distintas partes de los ejes y ruedas que forman el conjunto. Esto lo pueden realizar los buques tipo dique, con unos costados muy altos y con unas rampas reforzadas en popa, para embarcar mercancía rodada. Pueden transportar contenedores sobre los costados, además de las grandes cargas, permitiendo así el transporte combinado de mercancías.

#### **1.5.1.2 La carga izada (LIFT ON-LIFT OFF)**

Es aquella en que la carga se levanta mediante el uso de grúas, tanto del propio buque como del puerto. Para las grúas se tendrá en cuenta la capacidad de carga, radio de giro, condiciones de estabilidad, operaciones en tándem combinadas, valores de la marea y más requisitos para garantizar la seguridad de la mercancía. Algunos buques de estas características están equipados con unos pontones adicionales que garantizan más estabilidad transversal, ya que ofrecen un tanque de lastre extra por la borda del buque.



**Figura 12, método de izado de carga mediante grúas. [19]**

#### **1.5.1.3 La carga flotada (FLOAT ON-FLOAT OFF)**

Mediante el sistema de lastre el buque aumenta su calado, y la carga se remolca hasta la posición en la que descansara encima de la cubierta del buque cuando este recupere su calado habitual. La condición de estabilidad en este tipo de carga es crítica, ya que se debe tener mucho cuidado con no llegar nunca a valores negativos de estabilidad. Principalmente se tratan de los buques tipo “heavy lift” con mayor capacidad de carga, pudiendo llevar desde barcos averiados hasta plataformas petrolíferas.





Figura 13, buque semisumergible cargando un FPSO [20]

#### 1.5.1.4 Carga deslizada (SKID ON-SKID OFF)

El deslizamiento de la carga supone el traslado de la misma sobre el muelle hasta su posición final en el buque. El sistema de deslizamiento está constituido por unos raíles que son soldados al suelo y a la cubierta, creando así un puente de unión entre el buque y el muelle. En estos casos es un procedimiento es lento pero económico si se tratan de grandes pesos, dado que se debe situar la carga encima de los raíles. Un factor crítico es la marea, para evitar que la diferencia de alturas sea muy pronunciada ha de haber un buen plan o secuencia de lastrado.



Figura 14, carga deslizándose sobre cubierta del buque [21]

## **1.5.2 Clasificación según la carga a transportar**

### **1.5.2.1 Cubierta abierta**

Es un tipo de semisumergible, sin costados y que permiten que la carga sobresalga. Tan sólo cuentan con una cubierta de carga, que se encuentra desde los 10 hasta los 15 metros sobre la quilla, dependiendo del tamaño del buque. Esta cubierta, además de estar libre por los costados, también lo está por la popa. Unas torretas que se encuentran en la parte de popa, situadas una en cada costado, cumplen con el objetivo de estabilizar el buque cuando se encuentra sumergido. Estas torretas son removibles, por lo que pueden ser desmontadas, en caso de ser un estorbo para la carga, y de no ser necesarias al no tener que sumergirse el buque.

En proa se sitúa la superestructura, el puente y la maquinaria.

Para hacer sumergir el buque, son llenados todos los tanques de lastre que se encuentran bajo la cubierta principal, incluyendo las torretas, y algunos bajo el puente de gobierno. La distribución de los tanques de lastre está formada de manera que, cuentan con tanques altos y con tanques de doble fondo, alrededor de una gran cantidad de menores. De este modo el control sobre la estabilidad es mayor. Se usan bombas neumáticas y eléctricas para el lastrado. [[10]

### **1.5.2.2 Buques dique**

Se trata de otro tipo de buques semisumergibles, pero con paredes a lo largo de los costados y en popa, formando una cubierta baja en forma de U. Esto es una ventaja dado que la carga va más segura, pero al mismo tiempo limita su capacidad al no poder sobresalir por los costados. Tienen la posibilidad de abrir las compuertas de popa, pudiendo embarcar carga de forma rodada (ROLL ON-ROLL OFF) o deslizada (SKID ON-SKID OFF). Además, algunos tipos tienen grúas en sus costados, tanto fijas como móviles, que permiten izar la carga.

Generalmente esta clase de buques se divide en tres tipos:

**a) Combi dock:** El primer tipo son esos que tienen de dos a tres grúas en un costado, compuertas en popa y cubiertas móviles. Esto permite crear espacios estancos al sumergirse, y así embarcar cargas flotantes, junto con otra mercancía seca, previamente embarcada, además de poder embarcar carga de cualquiera de los métodos mencionados hasta ahora.

**b) Rolldock:** En segundo lugar, los buques dique con costados muy altos y con unas rampas reforzadas en popa, para embarcar mercancía rodada. Pueden transportar contenedores sobre sus costados, además de las grandes cargas, permitiendo así el transporte combinado de mercancías. No disponen de grúas propias.



Figura 15, buque dique Rolldock [16]

**c) Yatch transport:** Se trata de buques especializados en el transporte de yates. Equipados con costados verticales, quedando la carga al abrigo del oleaje, suelen introducirse las embarcaciones por popa cuando el buque está parcialmente sumergido. [10]



**Figura 16, buque especial para transporte de yates [10]**

### **1.5.3 Buques convertidos**

La primera clase de conversiones que se han realizado, han sido unas modificaciones de antiguos buques tanque de tipo panamax, a los que han variado su eslora e instalado una cubierta reforzada a una altura relativamente baja, libre de los costados y larga desde la proa hasta la popa. Estos buques tenían los puentes de gobierno a popa, los cuales se han mantenido junto con la zona de maniobra de proa y unos metros más, con el fin de permitir la estabilidad del buque durante la inmersión.

El segundo tipo de conversiones realizado por empresas marítimas ha sido las conversiones de unas gabarras, transformándolas en semisumergibles autopropulsados de popa abierta. Para ello han debido habilitarlos de maquinaria propulsora, de elementos para la navegación, y hasta modificarles la forma del bulbo, variando así la forma de su carena. La carena de una gabarra no está diseñada para navegar, por lo que se realizan pruebas de navegabilidad y de esfuerzos en tres dimensiones, logrando diseñar el nuevo bulbo. [8]



**Figura 17, antiguo petrolero reconvertido en semisumergible [14]**

## **1.6 Procesos de carga y descarga**

Los procesos de carga y descarga en este tipo de buques son especialmente complejos y lentos, debido principalmente al peso, volumen y dimensiones de las cargas a transportar. Es, por tanto, de vital importancia entender bien el procedimiento seguido, así como sus fases críticas, que en posteriores capítulos del proyecto serán de utilidad.

### **1.6.1 Consideraciones iniciales**

Antes de empezar todo el proceso, se requiere de una planificación minuciosa y de la elaboración de un contrato entre empresa y cliente.

Algunos puntos importantes a tener en cuenta son:

- Determinación de las principales dimensiones, volúmenes, pesos y geometría del objeto a transportar.
- Calculo de la estabilidad en condiciones de mar y viento adversas. Tanto en carga y descarga como en navegación.
- Estudio de situaciones climatológicas.
- Elección de la zona de carga y descarga, teniendo en cuenta el calado máximo que alcanzará el buque al ser lastrado. Se escogen aguas abrigadas debido a que es el momento más crítico.
- Calculo estructural
- Elección y fabricación de la cama de bloques donde descansará la carga. La cama de bloques no puede ser tan rígida que transmita los movimientos al objeto que se transporta, ni tan flexible que deje que se deslice por la cubierta de carga o que se derrumbe.
- Elección y disposición de medios de fijación de la carga.

### **1.6.2 Carga y descarga**

El buque se desplaza hasta una zona previamente acordada y estabiliza sus movimientos con anclas y cabos.

Una vez estabilizado se inicia un proceso de lastre controlado, dejando la cubierta de carga a la profundidad necesaria. Es importante destacar que la estabilidad positiva en estos casos no está garantizada, por lo que el procedimiento se debe realizar con la máxima rapidez posible.

Una vez alcanzado el calado deseado, la carga se desliza mediante remolcadores hasta la posición indicada, encima de la cama de bloques, y se estabiliza mediante alambres y cabos que unen la carga, la superestructura y otras partes del buque.

Inicia entonces la emersión nivelada hasta que la carga toca con la cama de bloques. En ese momento un equipo de buzos se asegura de que la posición es la correcta. Seguidamente, con la quilla del objeto y la cama de bloques en contacto, se inicia el deslastrado de proa, haciendo que esta emerja del agua.

Con un asiento positivo se empieza a deslastra la popa, nivelando el buque. Finalmente se deslastra el resto de agua hasta llegar al calado de navegación [10].

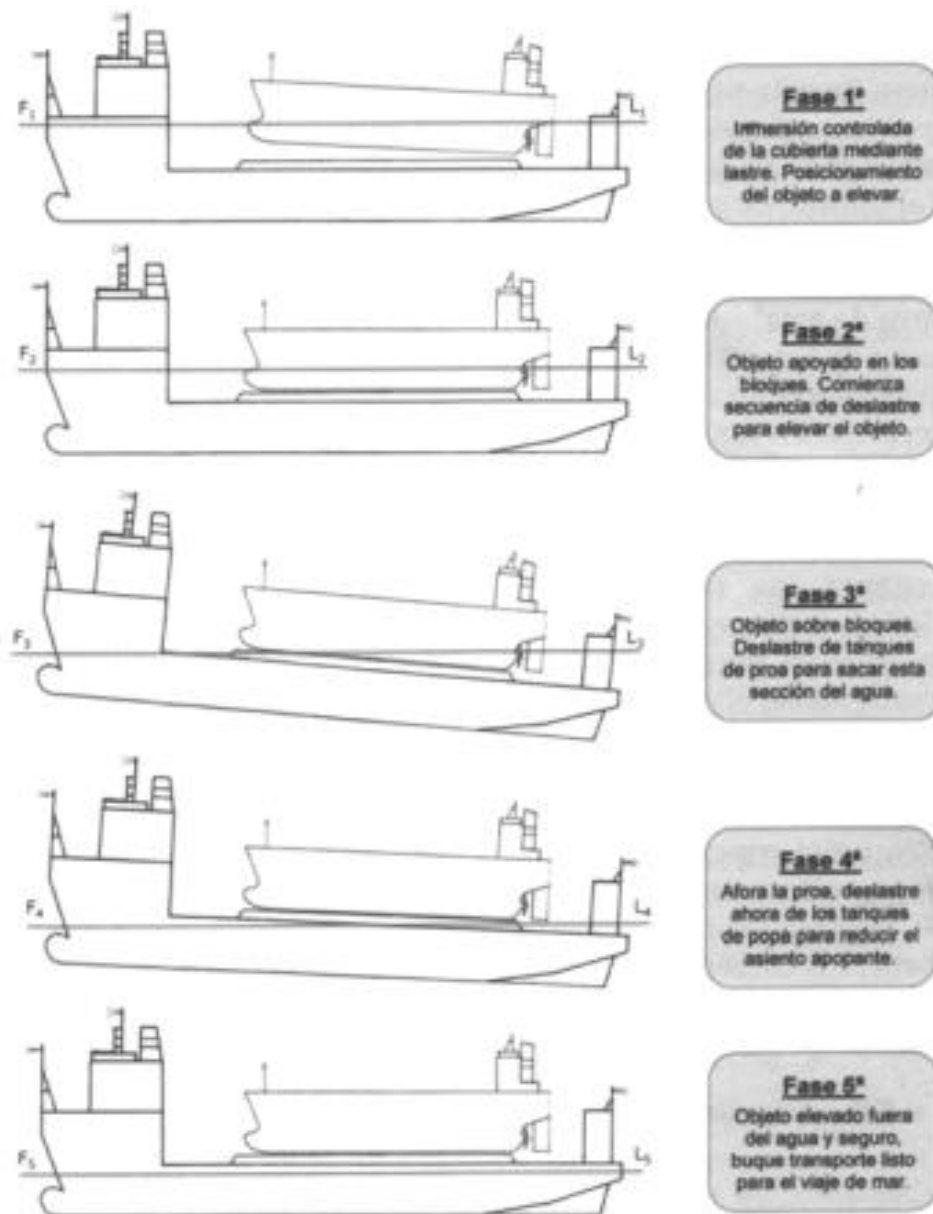


Figura 18, fases de la operación de carga normalizada [10]

### 1.6.3 Estabilidad crítica

Para posteriores capítulos es importante saber en qué fase la estabilidad alcanza valores críticos.

Durante todo el proceso de carga, la estabilidad debe estar perfectamente calculada, pero aún así existe un punto crítico donde cualquier error o variable no calculada puede hacer que la carga pierda estabilidad y ocurra un desastre.

Ese momento coincide cuando la quilla de la carga toca con la cama de bloques de la cubierta de carga del buque. Es decir, en la transición en la que la carga es estable debido al empuje del agua desplazada y el momento en que la estabilidad se debe a que descansa por completo sobre los bloques de la cama.



Lo que ocurre, es que el contacto de la quilla con la cama de bloques produce una fuerza vertical hacia arriba en la base de la carga, produciendo lo que se conoce como una elevación del centro de gravedad virtual de la carga. Esta elevación produce a su vez la disminución de la distancia entre centro de gravedad y metacentro, o que es responsable de la pérdida de la capacidad de recuperación.

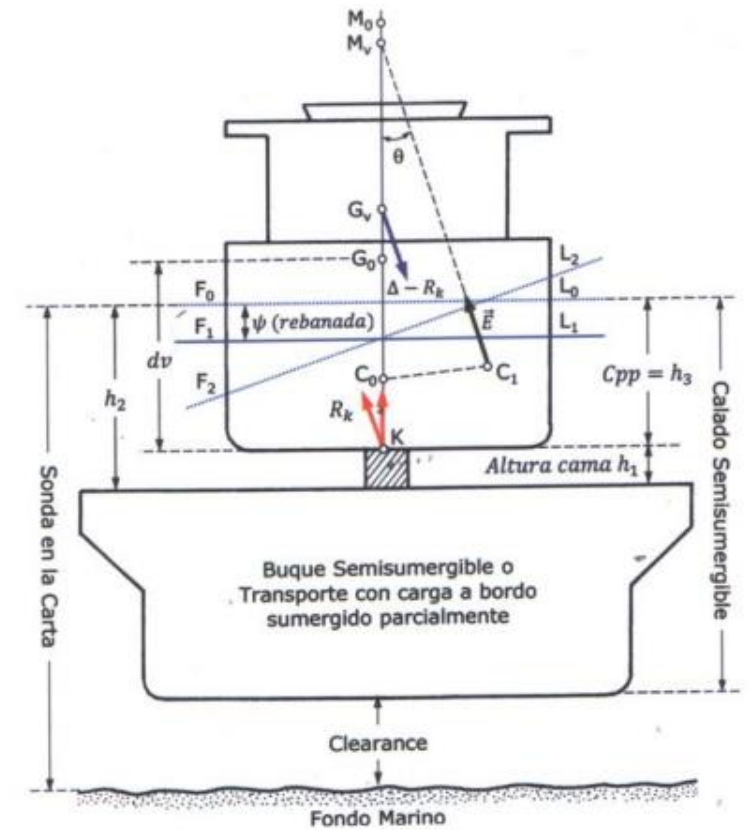


Figura 19, estabilidad transversal en el proceso de emersión [10]

El calado de inestabilidad o zozobra es, por tanto, el momento en que el metacentro está a la misma altura que el centro de gravedad. En ese preciso instante, el buque ya debería reposar en su totalidad en la cama de bloques para evitar el fallo de estabilidad.

Uno de los pasos más críticos a la hora de planificar cargas y descargas de este tipo de buques es el cálculo del mencionado calado de inestabilidad y/o zozobra.



## Capítulo 2. Dimensionamiento

El dimensionamiento consiste en determinar los parámetros básicos del buque. Al final de este capítulo se espera obtener las medidas principales del buque y sus coeficientes adimensionales más importantes.

El primer paso es obtener una base de datos fiable, y lo suficientemente extensa, de buques similares al estudiado. De este modo se podrá establecer relaciones lineales con las características que se imponen desde el inicio del proyecto.

## 2.1 Base de datos

Para obtener una base de datos lo suficientemente extensa se ha recurrido a la información que disponen algunas empresas como son la “*Dockwise Group* [13], *OHT (Offshore Heavy Transport)* [14] y *COSCOHT* [15]”, que actualmente poseen una gran mayoría de este tipo de buques en operación.

Inicialmente se compuso la base de datos con todos los buques disponibles de los que se pudo hallar información suficiente, pero surgieron dificultades para poder determinar relaciones lineales entre dimensiones sin mucha dispersión<sup>2</sup>. Algunos de los motivos de la falta de precisión son los siguientes:

- El tipo de buque estudiado es relativamente nuevo, por lo que constantemente surgen cambios que modifican sus dimensiones de manera significativa. En especial, en los últimos años se observa una tendencia al aumento de la manga.
- Las cargas para transportar son de un abanico de pesos y geometrías muy diversas, por lo que cada buque se construye acorde a determinadas situaciones de transporte.
- Algunos son creados de nueva construcción, mientras que otros son adaptaciones de antiguos petroleros, o gabarras, de modo que ciertos aspectos, como la aparición de bulbo o la manga son muy distintas.

Con tal de evitar la disparidad encontrada entre dimensiones principales de los buques se hace una selección de todos aquellos similares. Así se ha conseguido relaciones precisas, con un factor de dispersión mayor de 0.8, de acuerdo con [22].

---

<sup>2</sup> Cuanto mayor sea la dispersión entre los datos, mayor será el error y más lejos estaremos de resultados reales.

Finalmente se ha obtenido la tabla siguiente:

<b>Nombre</b>	<b>LOA(m)</b>	<b>Lpp(m)</b>	<b>B(m)</b>	<b>D(m)</b>	<b>Ds(m)</b>	<b>T(m)</b>	<b>DWT(t)</b>	<b>Lcub(m)</b>	<b>Área(m2)</b>
<b>Blue Marlin</b>	224.8	206.5	63	13.3	24.7	10.24	76061	178.2	11226.6
<b>Docwise Vanguard</b>	275	270	70	15.5	31.5	10.99	117000	275	19250
<b>Finesse</b>	216	212	43	13	22.7	9.6	48000	177	7611
<b>Transshelf</b>	173	162	40	12	22	8.8	34030	132	5280
<b>Forte</b>	216	212.1	43	13	26	9.69	48000	177.6	7636.8
<b>Fjell</b>	146.3	137	36		16.4	6.4	19300	119.8	4312.8
<b>Fjord</b>	159.2	157.8	45.5	9	17.1	6.1		139.2	5996.9
<b>Teal</b>	180.8	171.4	32.3	13.3	19.6	10	32101	126.6	4013.2
<b>Swift</b>	181		32.2	13.3	19.6	9.5	32650	126.6	4008.2
<b>White Marlin</b>	216.7	212.1	68	13	26	10	72146	177.6	11188.8
<b>Black Marlin</b>	217.8	206.5	42	13.3	23.4	10.11	57021	165.6	6955.2
<b>Tai An Kou</b>	156	145	36	10	16.4	7.5	20131	126	4536
<b>Xiang He Kou</b>	216.7	212.1	43	13	22.7	9.7	48163		7636.8
<b>Xiang Rui Kou</b>	216.7	212.1	43	13	22.7	9.7	48232	177.6	7636.8
<b>Xiang Yun Kou</b>	216.7	212.1	43	13	22.7	9.7	48232		7636.8
<b>Xia Zhi Yuan 6</b>	195.2	185.2	41.5	12	23	8.8	38000	153.6	6374.4
<b>Xin Guang Hua</b>	255	250.2	68	14.5	26.1	10.5	98000	211.2	14171.2
<b>Mighty Servant 3</b>	180.5	165.7	40	12	22	9.5	27720		5600
<b>Mighty Servant 1</b>	190.03	174.7	50	12	22	9.3	45407	150	7500
<b>Super Servant 3</b>	139.09	130.41	32	8.5	14.5	6.3	14138	140	3712
<b>Super Servant 4</b>	169.49	160.41	32	8.5	11.45	5.4	17600		4672
<b>Triumph</b>	216.8	209.7	45	14	23	10.4	53818	130	5720

Tabla 2, base de datos filtrada

Todas las unidades de distancia y de área se dan en metros y metros cuadrados respectivamente.

En el anexo 1 se puede observar la tabla completa, sin filtrar y con todos los datos de la base de datos inicial recopilada.

## 2.2 Obtención de las dimensiones principales

Como se ha podido observar en el capítulo 1 y en la base de datos, el buque proyecto tiene dos dimensiones especialmente, como son el peso muerto y la manga. Esto se debe a la finalidad de este tipo de buques, es decir, el transporte de grandes cargas de forma segura<sup>3</sup>.

En especial el valor de la manga afectará a la estabilidad del conjunto, por lo que se han probado diferentes relaciones entre dimensiones y se ha escogido aquella en la que la manga se obtenía con más precisión.

En el apartado que sigue, se han elaborado una serie de regresiones lineales y estudios estadísticos que relacionan dimensiones del buque, dónde se ha buscado la mínima dispersión posible. [22] [23]

Por lo tanto, se parte del peso muerto determinado en las especificaciones de proyecto, y mediante regresiones lineales obtenidas de la base de datos se establecen los otros parámetros.

$$DWT = 40.000 \text{ TPM}$$

---

<sup>3</sup> Lo que se busca con estos buques es transportar cargas pesadas, por lo que peso muerto es un requisito primordial. Además, en todo momento se debe garantizar una estabilidad suficiente para asegurar la carga.

### 2.2.1 Determinación de la LOA

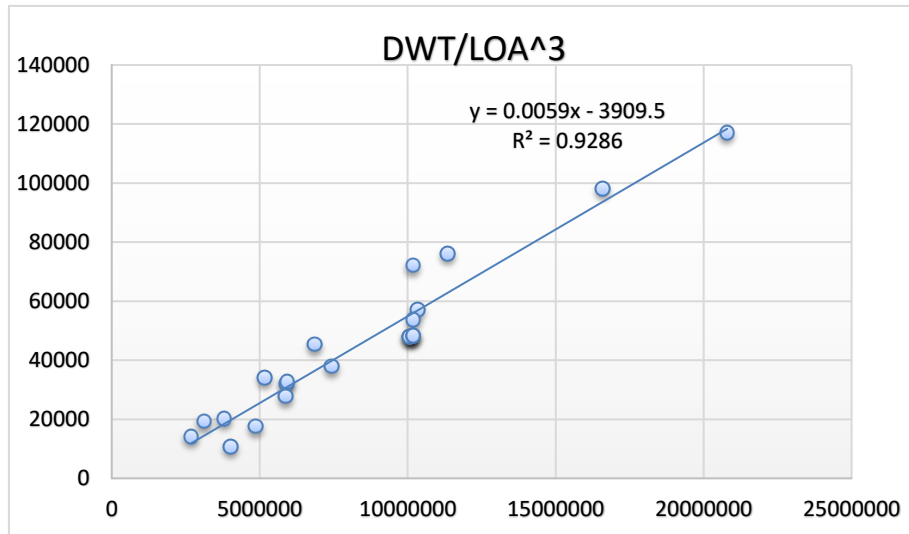


Figura 20, regresión línea entre DWT y LOA^3

$R^2$ : Indica el valor de dispersión de los parámetros relacionados. Deberá ser superior a 0.8.

Usando la ecuación de la recta obtenida, se calcula una LOA de:

$$40.000 = (0.059 * LOA) - 3909.5 \quad (1)$$

$$LOA = 195.24 \text{ m}$$

### 2.2.2 Determinación estadística del resto de esloras

A partir de la dimensión de la LOA se hace un estudio estadístico de los otros buques de los que se dispone, y se establece una relación de dimensiones entre LOA, Lpp y Lcub.

Análisis estadístico	T/Ds	LOA/LPP	Lpp/Lcub
Media	0.42066264	1.04611899	1.19275774
Mediana	0.42511013	1.05399568	1.19425676
Desviación	0.04003105	0.02729693	0.14348178
Varianza	0.00160248	0.00074512	0.02058702
Mínimo	0.34888889	1.00887199	0.9315
Máximo	0.51020408	1.08931804	1.61307692

**Tabla 3, relación entre esloras**

$$\frac{LOA}{Lpp} = 1.04611899 \quad (2)$$

$$\frac{Lpp}{Lcub} = 1.1927 \quad (3)$$

Con la LOA obtenida en el anterior apartado y las relaciones entre diferentes esloras resultantes del análisis se puede obtener Lpp y Lcub:

$$Lpp = \frac{195.24}{1.04611899} = 186.63 \text{ m}$$

$$Lcub = \frac{186.63}{1.19275774} = 156.47 \text{ m}$$

Nótese que, con el análisis realizado, también se hallará más adelante el calado máximo sumergido del buque gracias a la relación entre T y Ds.

### 2.2.3 Determinación de la manga

El siguiente paso es determinar la otra variable crítica del diseño, la manga, que es la dimensión que más puede garantizar la estabilidad del conjunto cuando se requiera cargar y transportar grandes cargas. Para ello se han cumplido dos requisitos.

- Regresión lineal con una dispersión de 0.8 o mayor.
- El valor de la manga debe ser el máximo posible obtenido de los distintos métodos de cálculo.

Una vez probadas las relaciones lineales de B con LOA, Lpp y Lcub, se observa que la dispersión es inferior a la deseada.

Otra opción es relacionar La longitud de cubierta con el área disponible de carga, y posteriormente con la manga del buque.

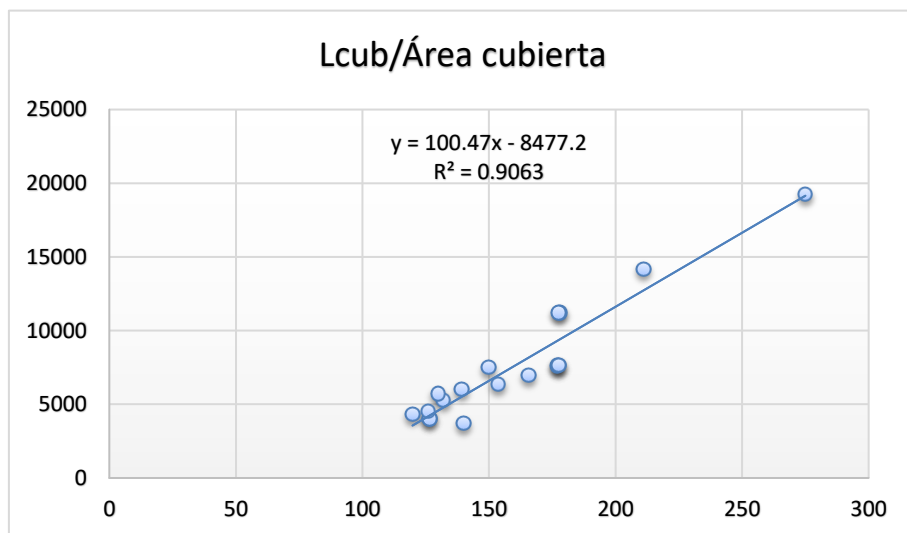


Figura 21, relación entre longitud de cubierta y área

$$Area = 100.47 * Lcub - 8477.2 \quad (4)$$

$$Area = 7243.5 \, m^2$$

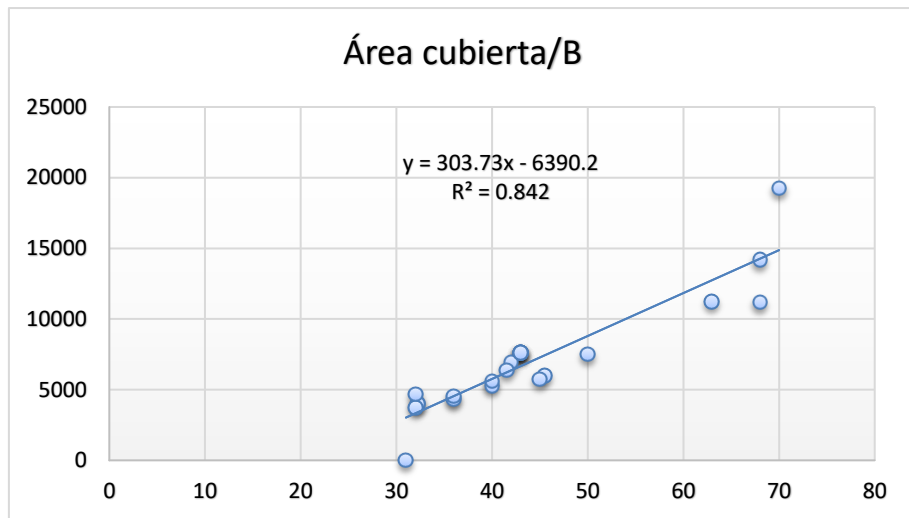


Figura 22, relación área con la manga

Con este procedimiento obtenemos menos dispersión y por lo tanto más fiabilidad en los resultados.

$$7243.5 = (303.73 * B) - 6390.2 \quad (5)$$

$$B = 44.88 \text{ m}$$

#### 2.2.4 Determinación de los calados

Para determinar el calado se establece la regresión lineal entre  $(DWT/Lpp*B)-T$ , obteniendo buenos resultados de dispersión. Seguidamente, mediante análisis estadístico se obtiene el puntal del buque y la máxima profundidad a la que puede llegar.



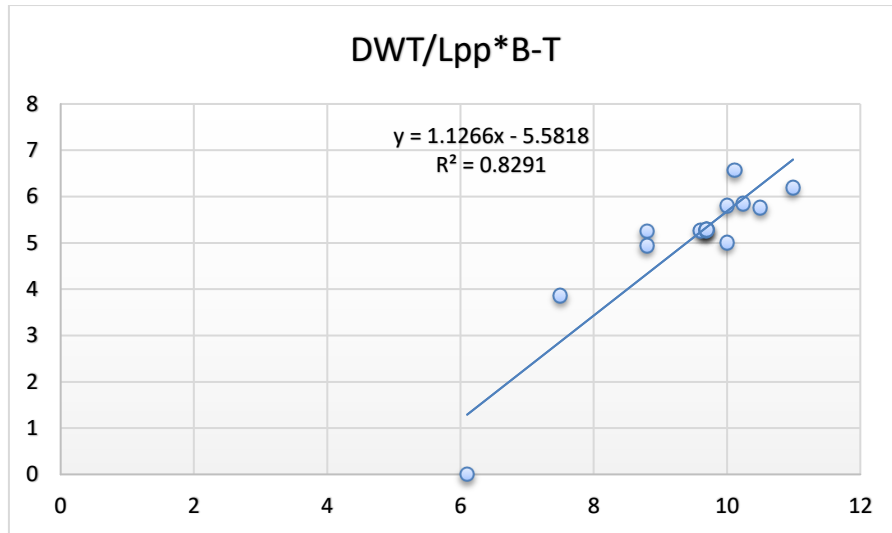


Figura 23, relación para obtención del calado

$$\frac{DWT}{Lpp} * B = 4.7747 \quad (6)$$

$$4.7747 = 1.1266 * T - 5.5818$$

$$T = 9.1927 \text{ m}$$

## 2.2.5 Determinación del resto de alturas

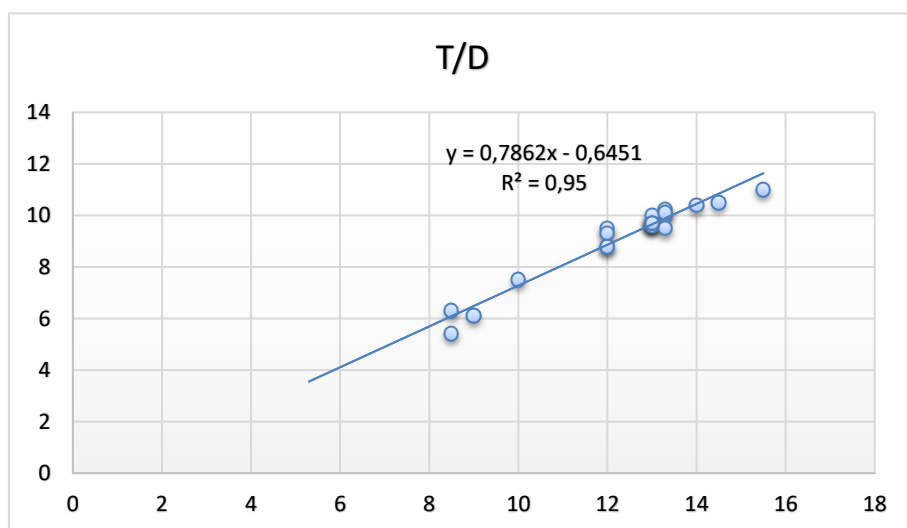


Figura 24, relación entre calado y puntal

$$9.1927 = 0.7862 * D - 0.6451 \quad (7)$$

$$D = 12.514 \text{ m}$$

Gracias al análisis realizado antes, se conoce la relación entre el calado (T) y el máximo calado sumergido (Ds).

$$\frac{T}{D_s} = 0.42066264 \quad (8)$$

$$D_s = 21.8530 \text{ m}$$

### 2.2.6 Obtención de la potencia máxima instalada

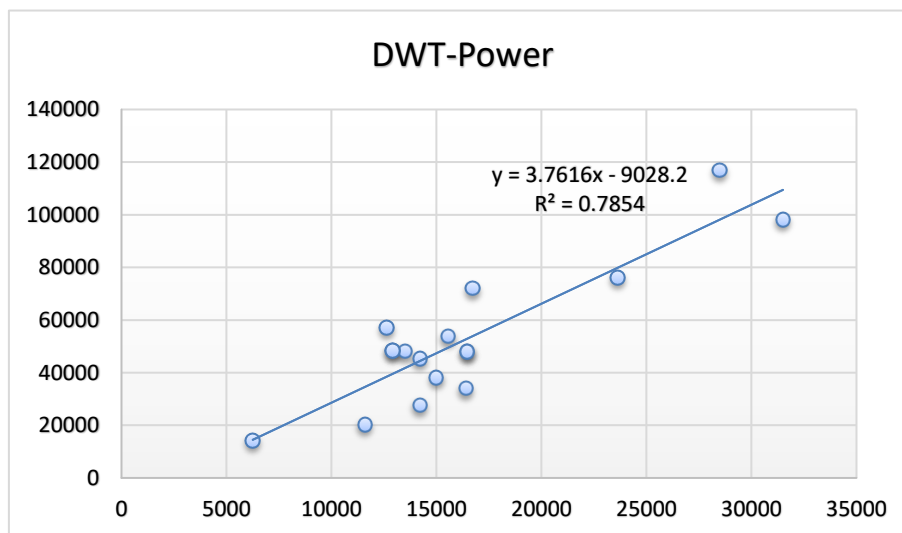


Figura 25, relación del peso muerto y la potencia

A pesar de no cumplir con los criterios inicialmente expuestos de tener una regresión lineal  $R^2$  superior a 0.8, se calcula la potencia total estimada. Se usará esta aproximación en posteriores capítulos como referencia.

$$40000 = 3.7616x - 9028.2 \quad (9)$$

$$P = 13033.8 \text{ Kw}$$

## 2.3 Obtención de los coeficientes adimensionales

Los coeficientes de forma son parámetros que nos permiten conocer el futuro comportamiento del buque. El más importante de ellos se conoce como Coeficiente de bloque ( $C_b$ ), que relaciona volumen que ocupa la carena con el del paralelepípedo formado por la eslora de flotación ( $L_{fl}$ ), la manga ( $B$ ) y el calado ( $T$ ).

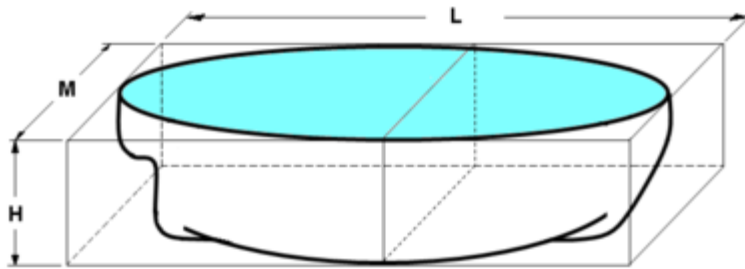


Figura 26, explicación gráfica del  $C_b$

A partir de valor de  $C_b$  obtenido, se puede proceder a calcular los otros coeficientes adimensionales, ya que uno depende de otro consecutivamente.

Tras estudiar posibles alternativas de cálculo de  $C_b$ , se llega a la conclusión que quizás la más acertada sea la que se obtiene de la siguiente fórmula [23]:

$$C_b = \frac{\nabla}{(L_{wl} * B * T)} \quad (10)$$

Hay que tener en cuenta que, dado que se trata de un tipo de buque relativamente nuevo, las fórmulas existentes que permiten calcular el coeficiente de bloque no se ajustan a las características del caso tratado.

Es, por lo tanto, de vital importancia hacer una buena estimación del peso en rosca<sup>4</sup> de la embarcación con tal de poder estimar el Cb. Una vez calculado todo lo esencial se comparará con datos obtenidos de buques similares para verificar su viabilidad.

### 2.3.1 Obtención del peso en rosca

La estimación del peso en rosca del buque se realiza de acuerdo con el libro “Methodologies of preliminary ship design”(Papanikolau,2014) [25].

El peso de un buque se divide en dos grandes partes, el peso en rosca y el peso muerto. Este último viene determinado por las especificaciones del proyecto.

$$\nabla = DWT + W_L \quad (11)$$

Por lo tanto, solo hace falta hallar el peso en rosca de la embarcación. Dicho valor es la suma del peso del acero, el de la maquinaria y el de los equipos y habilitación.

$$W_L = W_{ST} + W_{out} + W_m \quad (12)$$

El peso de acero ( $W_{ST}$ ) incluye todo el material que se emplea en el astillero, es decir, las chapas, los refuerzos, la superestructura, soldaduras....

El peso del equipo y la habilitación( $W_{out}$ ) incluye todo aquello que forma parte del buque para poder desarrollar su operación, como anclas, cadenotes, camarotes, elementos salvavidas, etc.

Finalmente, la maquinaria ( $W_m$ ) hace referencia al peso de los motores principales, auxiliares y a otros componentes estrechamente ligados a ellos, como filtros, purificadoras, intercambiadores de calor etc.

El cálculo del peso del acero se hace mediante una expresión que permite relacionar dos buques de características similares. Dicha fórmula incluye el peso del acero y de las superestructuras.

$$(W_{ST})' = W_{ST} * (1 + C_1 + C_2 \dots \dots + C_4) * (1 + C_7) \quad (13)$$

---

<sup>4</sup> Recordemos que  $\nabla$  es el desplazamiento del buque, es decir DWT + peso en rosca. Dado que DWT es conocido solo hace falta saber el peso en rosca del buque.

Dónde:

- $W_{ST}'$ : Será el peso del buque proyecto una vez aplicadas las correcciones

Correction for different length, $\delta L = L_1 - L_0$	$C_1 = 1.0 \delta L / L_0$
Correction for different breadth, $\delta B = B_1 - B_0$	$C_2 = 0.7 \delta B / B_0$
Correction for different side depth, $\delta D = D_1 - D_0$	$C_3 = 0.4 \delta D / D_0$
Correction for local strengthening components as to the length	$C_4 = 0.45 C_1$
Correction for local strengthening components as to the breadth	$C_5 = 0.35 C_2$
Correction for local strengthening components as to the side depth	$C_6 = 0.65 C_3$
Correction for different $C_B$ , $\delta C_B = C_{B1} - C_{B2}$	$C_7 = 0.3 \delta C_B$

Figura 27, correcciones aplicables al peso del acero

Los datos utilizados para poder estimar el peso del acero del buque proyecto se obtienen de la tesis doctoral “Estabilidad de un buque ultra heavy lift carrier” (Aguilar Vázquez, abril 2012) [60].

BUQUE BASE		
Cb	0.832	
Cp	0.839	
$\nabla$	114861	Tpm
Potencia	12640	KW
Peso acero	23146	T
Peso maquinas	2723	T
Equipos y Habilitacion	4762	T
LOA	206	M
B	63.08	M
D	13.3	M

Tabla 4, datos del buque Blue Marlin

Se parte de que el Cb será el mismo par ambos buques, y que los refuerzos serán también iguales, por lo tanto solo se aplican las correcciones referentes a la LOA, B y D, correspondientes a C1, C2 y C3 respectivamente.

Aplicando las pertinentes correcciones se obtiene el peso del acero aproximado del buque.

$$W_{ST} = 14174.73 \text{ t}$$

El peso definitivo se obtiene al multiplicar por un factor de reserva de 8%.

$$W'_{ST} = 15308.71 \text{ t}$$

El peso de los quipos y la habilitación se calcula con la siguiente expresión:

$$W_{out} = ke * Lpp * B \quad (14)$$

Dónde

- Ke: 0.45 para buques de carga general.
- Lpp: 186.63 m
- B: 44.88 m

$$W_{out} = 4146.097 \text{ t}$$

Al anterior valor se le ha aplicado una corrección del 10%.

Según “El proyecto básico del buque mercante” (Alvariño Castro, Azpíroz y Meizoso Fernández, Madrid 1997) [26], el peso de la maquinaria ( $W_m$ ) se divide en: Maquinaria principal ( $W_{Mp}$ ), maquinaria auxiliar ( $W_{Ma}$ ) y otros equipos ( $W_{mm}$ ).

Se pueden estimar según las siguientes formulas:

$$W_{Mp} = 0.02 * P \quad (15)$$

Dónde:

- P: 13052 Kw, es la potencia máxima estimada al inicio del capítulo.

$$W_M = 0.02 * 13052 = 261.3 \text{ t}$$

$$W_{Ma} = Km * (P^{0.7}) \quad (16)$$

Dónde:

- Km:0.59

$$W_{Ma} = Km * (13052^{0.7}) = 4789.24 \text{ t}$$

Para hallar el resto de peso de los elementos de la cámara de máquinas, se debe obtener antes la longitud teórica (Lcm) y el volumen estimado de la cámara de máquinas (Vcm) en función de su potencia máxima instalada.

$$W_{mm} = V_{cm} * 0.03 \quad (17)$$

$$V_{cm} = L_{cm} * B * D * \left( \frac{3.217 * L_{cm}}{L_{pp} - 0.0655} \right) \quad (18)$$

$$L_{cm} = 0.002 * P_{max} + 5.5$$

$$W_{mm} = 255.47 \text{ t}$$

El peso en rosca total calculado se obtiene de la suma de los pesos obtenidos hasta ahora:

$$W_L = 15308.71 + 4146.097 + 965.58 \quad (19)$$

$$W_L = 20450.75 \text{ t}$$

Quedando un desplazamiento estimado ( $\nabla$ ) del buque de 60450.75 t.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Se obtiene de sumar el DWT=40000 t

### 2.3.2 Obtención de los coeficientes

Una vez encontrado el valor del desplazamiento preliminar del buque estudiado se puede estimar su  $C_b$  y por consiguiente los demás coeficientes adimensionales.

$$C_b = 0.7661$$

El coeficiente de la cuaderna maestra se calcula de acuerdo con la fórmula de Kernel [26]:

$$C_m = 1.006 - 0.0056 * C_b^{-0.56} \quad (20)$$

$$C_m = 0.9915$$

El coeficiente prismático se obtiene de la relación entre el  $C_b$  y el  $C_m$ .

$$C_p = \frac{C_b}{C_m} = 0.7727 \quad (21)$$

Coeficiente de flotación se calcula con la relación que sigue:

$$C_w = 0.248 + 0.778 * C_b = 0.844 \quad (22)$$



## 2.4 Discusión de los resultados.

Las dimensiones principales obtenidas se muestran en la tabla a continuación.

<b>LOA</b>	195.24	m
<b>Lpp</b>	186.63	m
<b>Lcub</b>	156.47	m
<b>B</b>	44.88	m
<b>Área cubierta</b>	7243.5	m <sup>2</sup>
<b>T</b>	9.19	m
<b>D</b>	12.51	m
<b>Ds</b>	21.84	m

**Tabla 5, resumen de los datos del capítulo**

Los valores obtenidos son coherentes con la base de datos inicial y se encuentran dentro de los parámetros. Para buques con un peso muerto similar, las mangas más comunes van desde los 41 m a los 50 m.

La longitud de cubierta es también coherente, dado que permite una buena superestructura a proa, lugar donde se sitúan la mayoría de los equipos.

En el capítulo a continuación se aproximarán unas formas a dichos valores obtenidos.

Los coeficientes adimensionales del buque proyecto se muestran en la tabla a continuación.

<b>CB</b>	0.76617538
<b>Cm</b>	0.99154628
<b>Cp</b>	0.77270763
<b>Cw</b>	0.84408444

**Tabla 6, coeficientes adimensionales obtenidos**

El coeficiente de bloque es un valor que influye directamente en la resistencia al avance del buque, cuanto mayor es el valor, la resistencia por olas y la resistencia viscosa se incrementan. Esto hace necesario, en ocasiones, la instalación de un bulbo de proa para mejorar el rendimiento.

Cabe destacar que el Coeficiente de bloque ( $C_b$ ) obtenido es relativamente bajo dadas las formas habituales en este tipo de buques, por lo que en el capítulo siguiente se lidiará con las formas para intentar aproximar al máximo los valores obtenidos.

Por otro lado, se observa como el coeficiente de la cuaderna maestra ( $C_m$ ) es muy cercano a 1, por lo que el cuerpo central del buque estará formado por cuadernas en forma de U, dando unas formas muy llenas que incrementan el amortiguamiento en el balance y sus estabilidades.

El coeficiente prismático ( $C_p$ ) nos da información de la distribución de peso a lo largo de la eslora, cuanto menor, más concentración de los pesos en la sección media del buque.

El coeficiente de flotación alto es beneficioso para la estabilidad y para el comportamiento en a mar, ya que aumenta la inercia de flotación y la altura del centro de carena del buque.

## Capítulo 3. Formas

En el siguiente capítulo se obtendrán las formas del buque en función de las dimensiones obtenidas en el dimensionamiento. Para ello se utilizará el software *Maxsurf Modeler* [34] que permite partir de un diseño 3D de su base de datos y modificarlo hasta adaptarlo a nuestras medidas.

De manera análoga se llevará a cabo un análisis de la resistencia al avance del buque que dispone también el software maxsurf para optimizar el rendimiento propulsivo en posteriores capítulos.

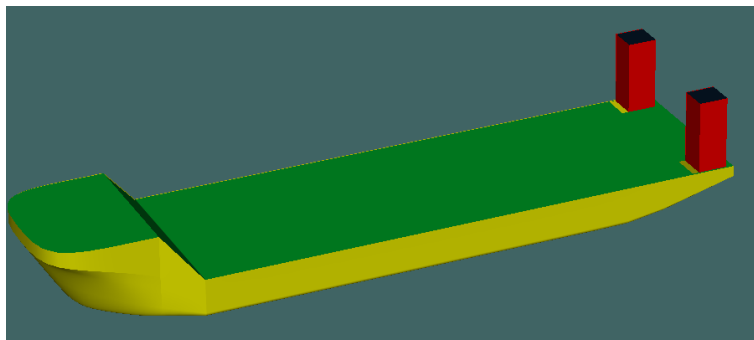
Finalmente se realizará el plano de formas, que se puede ver en el anexo 5.

### 3.1 Procedimiento seguido

1. Buscar modelo proporcionado por el software “*Maxsurf Modeler*” [34].
2. Aplicar transformaciones paramétricas<sup>6</sup>
3. Comprobar los resultados y modificar puntos de control
4. Iterar hasta conseguir el resultado deseado
5. Comprobar la resistencia en “*Maxsurf resistance*” [41] .
6. Repetir el proceso hasta conseguir una resistencia al avance aceptable.

### 3.2 Formas iniciales

Se parte de las formas obtenidas del propio software con el que se trabaja. En la base de datos del programa se incluye un modelo de Heavy Lift Semisumergible que presenta la siguiente geometría:



**Figura 28, modelo de partida**

Como se puede ver en la imagen superior, las formas están hechas a partir de 3 superficies (cada una resaltada de un color), esto facilitará la edición posterior de los puntos de control.

Además, el software nos permite también observar de manera análoga las otras vistas representativas del buque, la planta, el perfil y el alzado.

---

<sup>6</sup> Se entiende transformación paramétrica cualquier cambio de variables manteniendo otras fijas, por lo que la geometría cambiará respetando los límites que le imponamos al programa.

La superestructura que aparece en el diseño no se tomará en cuenta, ya que más adelante se dimensionará con los cálculos que se vayan desarrollando.

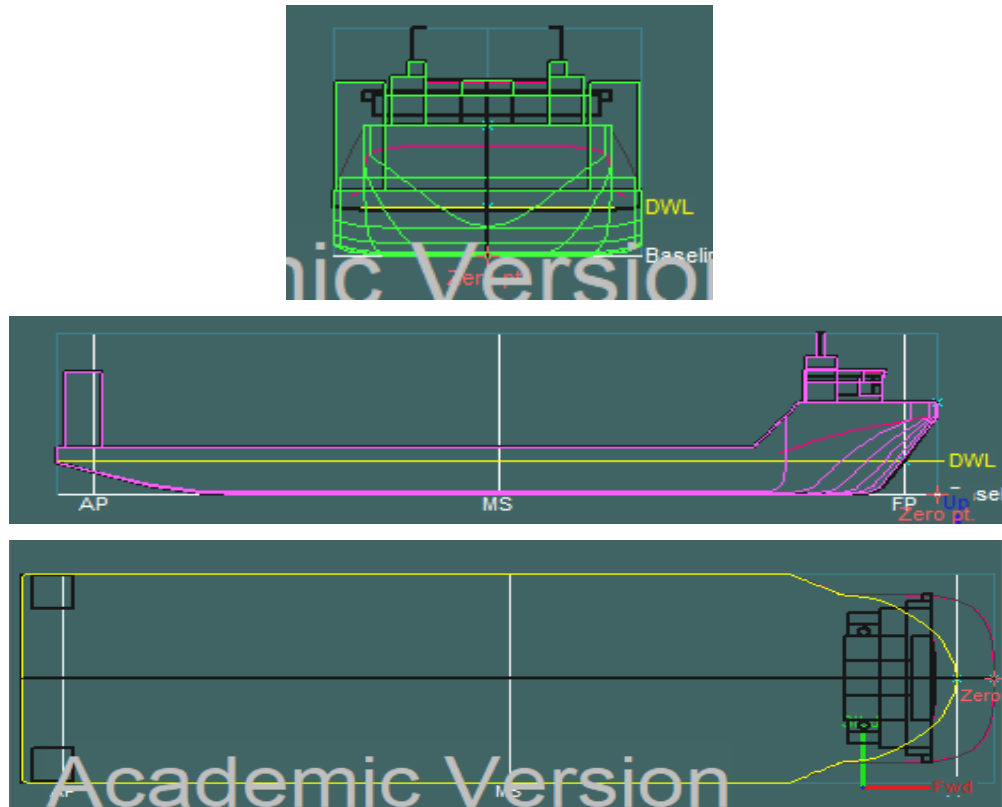


Figura 29, alzado, perfil y planta del buque de partida

Los datos hidrostáticos del buque con las formas presentadas son los siguientes:

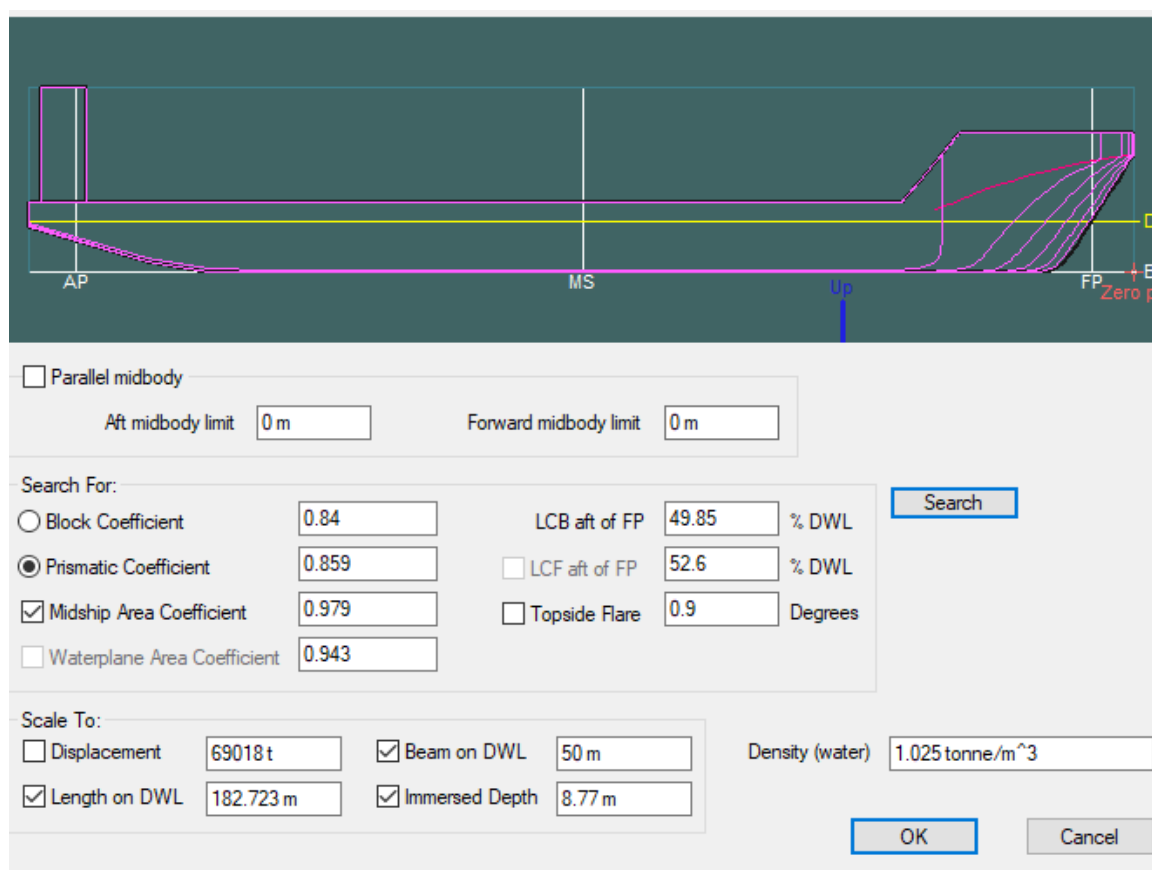
<b><math>\nabla</math></b>	69017	t
<b>Vc</b>	67333,219	m <sup>3</sup>
<b>T</b>	8,770	m
<b>Lfl</b>	182,723	m
<b>B</b>	50,000	m
<b>Am</b>	11096,947	m <sup>2</sup>
<b>AM</b>	429,115	m <sup>2</sup>
<b>Cp</b>	0,859	
<b>Cb</b>	0,840	
<b>Cm</b>	0,979	

<b>Cfl</b>	0,945	
<b>Cc</b>	-98,413	Desde 0 (Proa) m
<b>Cwl</b>	-103,357	Desde 0 (Proa) m

**Tabla 7, datos iniciales del buque del programa**

Una vez se han obtenido los datos hidrostáticos del buque de la base de datos se determinan una serie de datos:

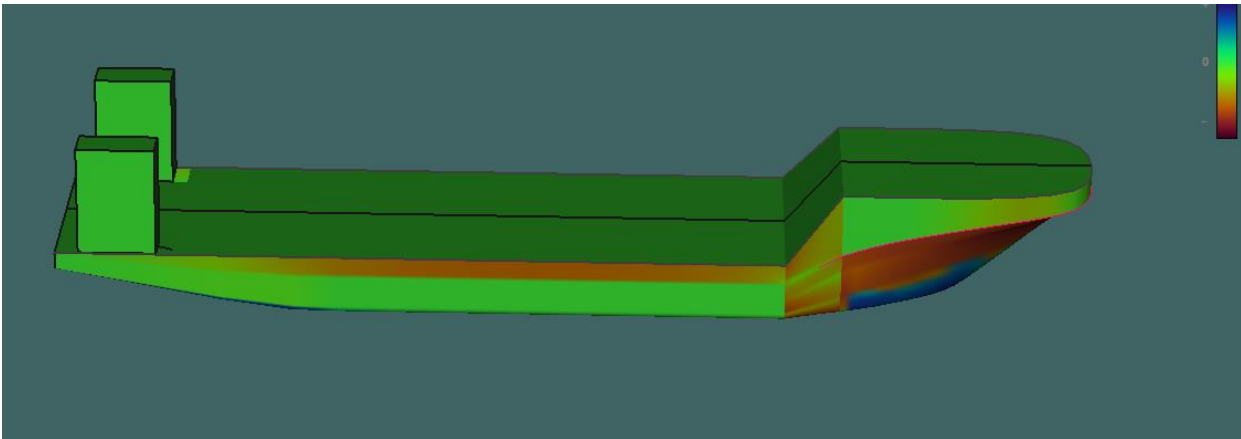
- El cero se toma a la altura de la línea base y en el espejo de popa.
- Se coloca la línea de flotación en el calado de diseño obtenido.
- Se sitúan las perpendiculares de proa y popa.



**Figura 30, ventana de transformaciones paramétricas de maxsurf**

El primer paso es adaptar las formas básicas del buque modelo al buque proyecto. Para ello se recurre a la opción de transformaciones paramétricas, que nos permite cambiar las dimensiones principales del buque L, B y T.

El procedimiento es sencillo, el programa nos permite liberar la dimensión que queremos calcular y fijar el resto. Se trata de un proceso de repetición en la que se va modificando las variables fijadas y libres hasta llegar a las requeridas en el dimensionamiento.



**Figura 31, formas obtenidas tras los primeros cambios**

La imagen anterior es el modelo obtenido tras aplicar las transformaciones paramétricas, en ella se pueden observar varias diferencias:

- *Casings*<sup>7</sup> de popa con más volumen, debido a la pérdida de volumen de carena en popa.
- Castillo de proa alargado para satisfacer el descenso del coeficiente de bloque.
- Cubierta de carga de menor longitud a medida que nos acercamos a las dimensiones requeridas.

A continuación, se modifican los puntos de la malla de control para adaptar las formas a del buque a una menor resistencia al avance y respetando las dimensiones del proyecto.

---

<sup>7</sup> Es como se conocen a las reservas de flotabilidad colocadas en popa de este tipo de buque.

### 3.3 Perfil de proa

Como se puede observar en la imagen anterior, el diseño proporcionado no está dotado de bulbo de proa. Es importante recalcar que en la actualidad algunos de estos buques se les dota de dicho bulbo. Para comprobar si se debiera añadir, se recurre a las condiciones dadas en el proyecto básico del buque mercante [26].

Parámetro	Mínimo	Máximo	Resultado
<b>Cb</b>	0.65	0.81	0.766
<b>Lpp/B</b>	5.5	7	4.158
<b>Cb*B/L</b>		0.135	0.1761
<b>Fn</b>	0.16	0.57	0.156

**Tabla 8, requerimientos de instalación de bulbo de proa**

Dado que la mayoría de los valores no los cumple, se opta por no añadir un bulbo de proa. Al hacerlo, las formas de nuestro buque se asemejarán más a algunos existentes. En el Anexo 2 se pueden observar distintos tipos de buques con y sin bulbo.



**Figura 32, buque Mighty Servant, sin bulbo de proa**



En proa, y debido a la necesidad de disminuir tanto el  $C_b$  como la resistencia al avance, se ha diseñado las cuadernas en forma de V de modo que la entrada del agua en contacto con el casco sea más suave y se disminuya la resistencia por formación de olas.

### 3.4 Perfil de popa

El perfil de popa está formado por cuadernas en forma de U, y con un ángulo de inclinación con la horizontal muy bajo, dejando así una superficie lo suficientemente plana para evitar que los propulsores que se instalarán posteriormente no estén excesivamente inclinados. De este modo también permite un flujo de agua más directo hacia las hélices, permitiendo así aumentar su rendimiento.

La manga en popa será la misma que a lo largo de toda la cubierta, así se aumenta la estabilidad en condiciones de operación.

Finalmente, se diseña la popa con espejo, debido a la necesidad de tener una cubierta corrida hasta la popa.

### 3.5 Aspectos relevantes

El cuerpo central del buque estará formado por cuadernas en forma de U, que se extenderán a lo largo de toda la cubierta de carga, aumentando así la estabilidad de la misma.

Se modificarán también el volumen de los espacios de flotación (*casings*) de popa, para verificar que se cumplen los criterios de la Sociedad de Clasificación para reservas de flotabilidad.

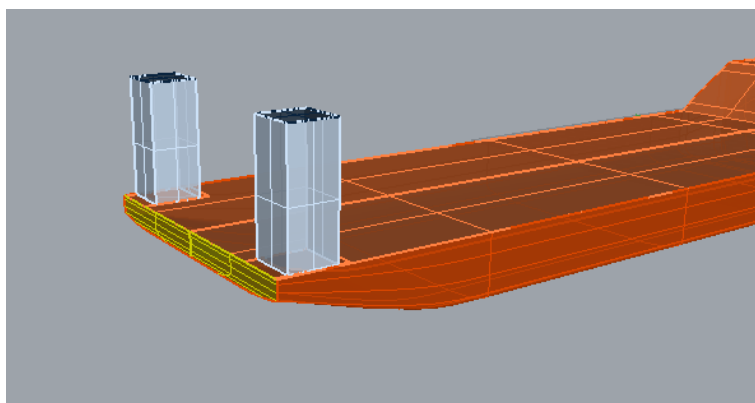
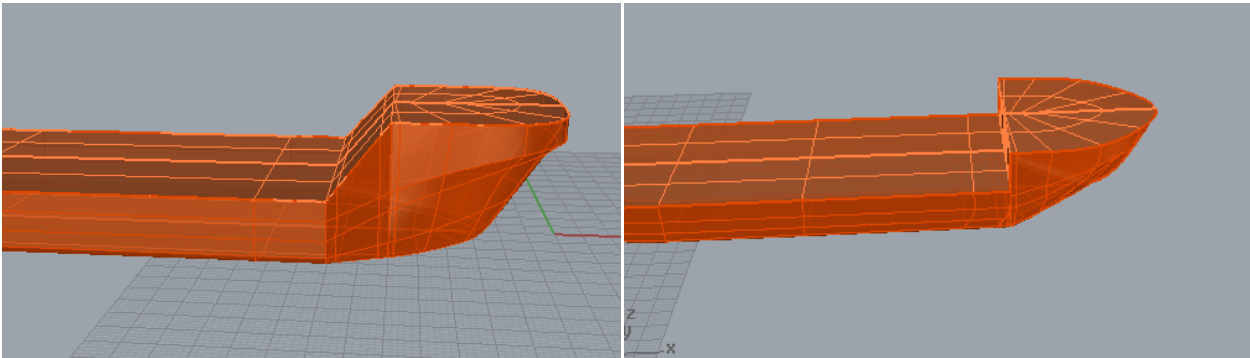


Figura 33, reservas de flotabilidad de popa

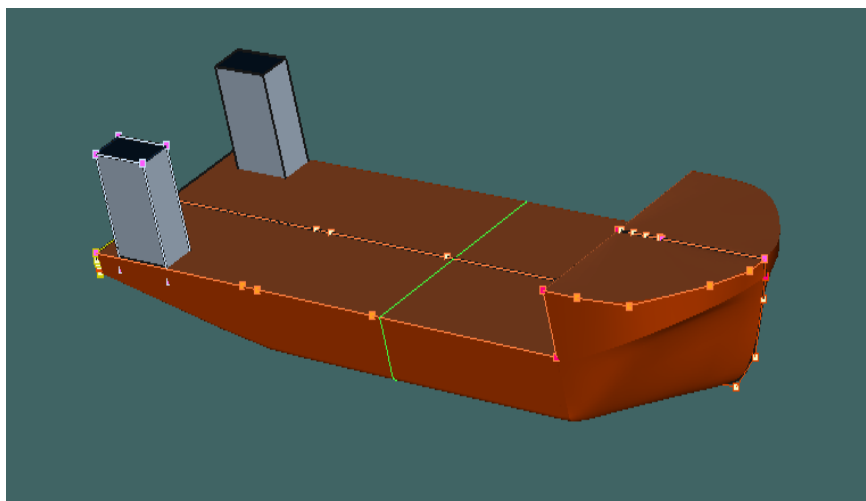
Se modificará las formas del castillo de proa, de modo que acabe verticalmente con la cubierta de carga, maximizando así el espacio disponible de cubierta.



**Figura 34, modificación de la eslora de cubierta de carga**

### 3.6 Resultados finales

Una vez aplicados los cambios de proa, popa y cuerpo central pertinentes, se aplican de nuevo las transformaciones paramétricas implementadas al inicio del capítulo, que habrán cambiado ligeramente, y se obtienen las formas definitivas del buque.



**Figura 35, formas finales del buque proyecto**

Los datos hidrostáticos obtenidos son los siguientes:

Parámetro	Dimensionamiento	Forma final	Inicial	Unidad
$\nabla$	60450.7	61238	69017	t
Volumen desplazado		59744.344	67333,219	m <sup>3</sup>
T	9.19	9.190	8,770	m
Lfl		188.574	182,723	m
B	44.88	44.881	50,000	m
Am		10402.765	11096,947	m <sup>2</sup>
AM		407.173	429,115	m <sup>2</sup>
Cp	0.772	0.778	0,859	
Cb	0.766	0.768	0,840	
Cm	0.991	0.990	0,979	
Cfl	0.844	0.933	0,945	
Cc		96.850	91,413	Desde 0 en m
Cwl		88.168	86.64,357	Desde 0 en m

Tabla 9, comparación de datos finales e iniciales

A continuación, se muestran las curvas de áreas de las que se partía y las obtenidas tras la implementación de todos los cambios comentados.

El área final obtenida es menor debido a a que los cambios que se han implementado conllevan un descenso de Cb, hacieno que la caena tenga unas formas menos llenas.



Figura 36, curva de áreas final obtenida

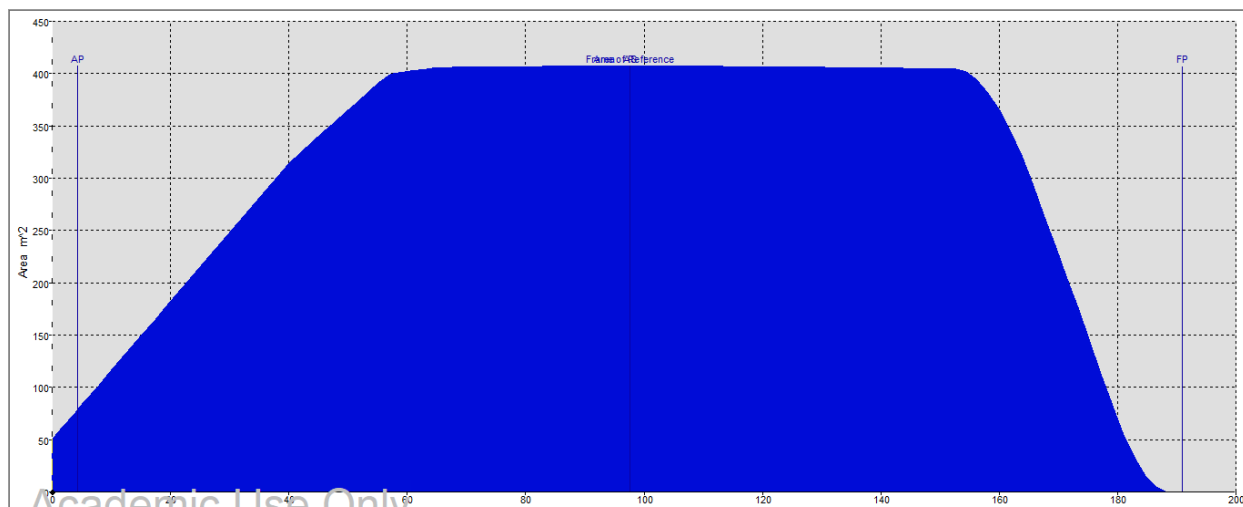


Figura 37, curva de áreas inicial del modelo de *maxsurf*

## Capítulo 4. Predicción de la potencia

El objetivo del presente capítulo es dimensionar el sistema propulsivo del buque, tanto los propulsores principales como los auxiliares.

Además, se analizarán todos los sistemas que intervienen en el avance del buque.

Primeramente, se calculará la resistencia al avance mediante un software especializado y con los resultados ya se podrá estimar una potencia instalada requerida en el buque.

Se pretende escoger entonces el mejor sistema propulsivo, que cubra lo mejor posible las necesidades operativas del buque y que cumpla una serie de requisitos de rendimiento mínimos.

## 4.1 Dimensionamiento de propulsor y cálculos de potencia

Una vez se obtienen unas formas para el casco del buque proyecto, se procede a realizar la predicción de resistencia al avance. Dicha predicción permitirá elegir un propulsor que entregue la potencia necesaria para vencer la resistencia, y consecuentemente se podrá escoger un motor principal que suministre energía a las hélices.

Para calcular la resistencia al avance del buque se utiliza la herramienta de *Maxsurf Resistance* [41], que permite escoger un método concreto de análisis entre los muchos que ofrece.

### 4.1.1 Cálculo de la resistencia

Como se ha comentado en el anterior apartado, las formas del buque se han desarrollado de forma análoga a este capítulo, obteniendo así una geometría que disminuyese al máximo posible la resistencia al avance del modelo creado.

Diferentes aspectos deben tener en cuenta para llevar a cabo el análisis:

- Determinar el análisis a realizar. El programa hace distinción entre buques de planeo o desplazamiento, siendo apropiado la selección del segundo tipo.
- Rango de velocidades de proyecto. En el caso del buque proyecto la velocidad de crucero es de 13 Kn.
- Eficiencia. Se escoge al 100% dado que los rendimientos se aplicarán más tarde.

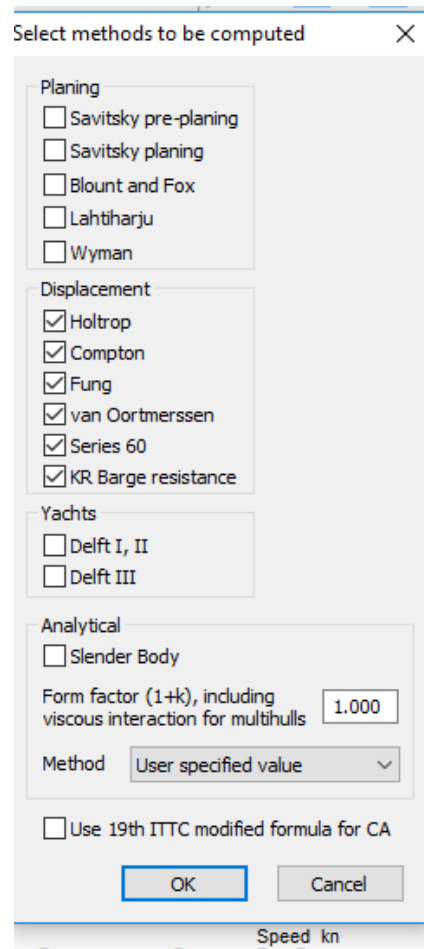


Figura 38, las distintas opciones de análisis de resistencia

Los diferentes tipos de análisis de resistencia al avance de los buques de desplazamiento son:

- **Holtrop i Menen:** Aplicado en cargueros, petroleros, pesqueros, remolcadores y portacontenedores.
- **Van Oortmerssen:** Empleado en remolcadores y buques de pesca
- **Series 60:** Aplicado a buques de carga de un solo eje.
- **Compton:** buques costeros en régimen de desplazamiento o semi-desplazamiento.
- **Fung:** Igual que el método Compton pero mayores y con popa en espejo.
- **KR Barge resistance:** Usado en barcasas.

El método que mejor cumplen los requisitos del análisis es el de Holtrop i Menen.

Parámetro	Mínimo	Proyecto	Máximo
Fn	-	0.3040	0.45
Cp	0.55	0.77	0.85
L/B	3.9	4.4	15
B/T	2.1	4.8	4

Tabla 10, criterios de uso del método Holtrop i Mennen

A pesar de no cumplir unos de los requisitos, es el mejor método de predicción de resistencia al avance con el que se cuenta para el proyecto. Por lo que se utilizará como aproximación válida.

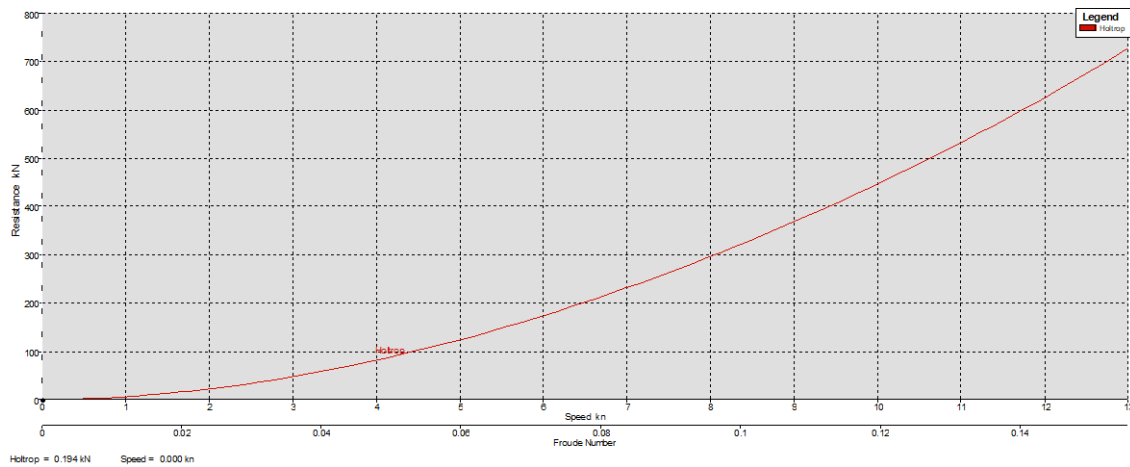
Se obtiene la siguiente tabla de valores al realizar el análisis.

Velocidad(Kn)		Fn	R(KN)	EHP(KW)
0	0	0	-	-
0.325	0.004	0.009	0.7	0.119
0.650	0.008	0.017	2.6	0.880
0.975	0.012	0.026	5.7	2.840
1.300	0.016	0.034	9.8	6.527
1.625	0.019	0.043	14.9	12.444
1.950	0.023	0.051	21.0	21.083
2.275	0.027	0.060	28.1	32.918
2.600	0.031	0.068	36.2	48.413
2.925	0.035	0.077	45.2	68.022
3.250	0.039	0.085	55.1	92.188
3.575	0.043	0.094	66.0	121.343
3.900	0.047	0.102	77.7	155.912
4.225	0.051	0.111	90.3	196.310



4.550	0.054	0.120	103.8	242.944
4.875	0.058	0.128	118.1	296.213
5.200	0.062	0.137	133.3	356.507
5.525	0.066	0.145	149.2	424.209
5.850	0.070	0.154	166.0	499.694
6.175	0.074	0.162	183.6	583.330
6.500	0.078	0.171	202.0	675.477
6.825	0.082	0.179	221.2	776.488
7.150	0.086	0.188	241.1	886.711
7.475	0.089	0.196	261.7	1006.485
7.800	0.093	0.205	283.1	1136.145
8.125	0.097	0.213	305.3	1276.025
8.450	0.101	0.222	328.1	1426.454
8.775	0.105	0.231	351.7	1587.766
9.100	0.109	0.239	376.0	1760.298
9.425	0.113	0.248	401.0	1944.402
9.750	0.117	0.256	426.7	2140.446
10.075	0.121	0.265	453.2	2348.828
10.400	0.124	0.273	480.4	2569.982
10.725	0.128	0.282	508.3	2804.394
11.050	0.132	0.290	537.0	3052.614
11.375	0.136	0.299	566.5	3315.270
11.700	0.140	0.307	597.0	3593.091
12.025	0.144	0.316	628.3	3886.921
12.350	0.148	0.324	660.7	4297.739
12.675	0.152	0.333	683.2	4586.684
13.000	0.156	0.342	705.2	4695.073

**Tabla 11, valores de resistencia y EHP según la velocidad de avance**



**Figura 39, incremento de resistencia en función de la velocidad**

A la velocidad de diseño de 13 Kn, los valores de resistencia y potencia estimada son los obtenidos en la tabla.

$$R = 705.2 \text{ KN}$$

$$P = 4695,073 \text{ KW}$$

#### 4.1.2 Incremento de la resistencia por túneles transversales de proa

Según el documento "An approximate power prediction method" [33], la resistencia añadida por los túneles transversales de popa se puede estimar de la siguiente expresión:

$$R_t = \rho * V^2 * A * K \quad (23)$$

Dónde:

K: Coeficiente que toma un valor de entre 0.003-0.012. Se toma 0.007 para el cálculo.

A: Área de los túneles.

V: Velocidad del buque máxima en Kn.

$$R_t = 23.8 \text{ KN}$$

La resistencia total de la embarcación será la suma de la calculada con el software más la añadida por lo túneles transversales, obteniendo el resultado mostrado a continuación.

$$R_{total} = R_t + R \quad (24)$$

$$R = 729 \text{ KN}$$

## **4.2 Sistema propulsivo**

### **4.2.1 Tipos de sistemas propulsivos**

De la observación de la base de datos elaborada en el Capítulo 2, se pueden extraer algunas conclusiones respecto al sistema propulsivo de esta clase de buques. Los distintos tipos de propulsión que se encuentran se citan y explican brevemente a continuación.

#### **4.2.1.1 Propulsión diésel mecánica**

Los más antiguos funcionan con el sistema convencional de la mayoría de cargueros, es decir, motores diésel grandes y lentos, con línea de eje/s y el conjunto hélice-timón. El hecho de usar motores grandes hace que no haga falta reductora, de modo que las pérdidas mecánicas son menores. Por el contrario, la maniobrabilidad y el control de la potencia entregada a la hélice son mucho menores.

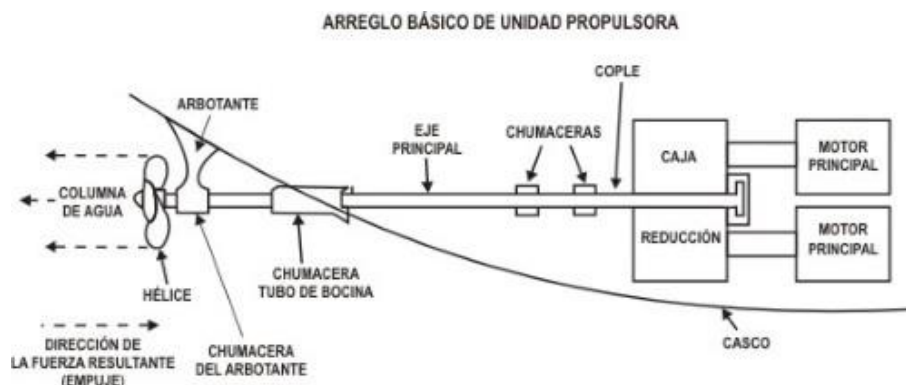


Figura 40, esquema típico de propulsión diésel

#### 4.2.1.2 Propulsión eléctrica

Los más recientes, a partir del año 2000, están equipados con sistemas de generación diésel-eléctricos. Hay varios tipos de propulsión eléctrica.

- a) El más común son motores eléctricos semirrápidos conectados a unos PODS<sup>8</sup> mediante conexiones con diferentes cuadros de control, convertidores, transformadores y convertidores de frecuencia. Todo para adecuar la corriente de salida de los motores a la de consumo de los PODS. Son sistemas altamente eficientes, que dan libertad a la disposición de la cámara de máquinas a lo largo de la eslora y proporcionan una gran maniobrabilidad. Por el contrario, requieren de una inversión mucho mayor.

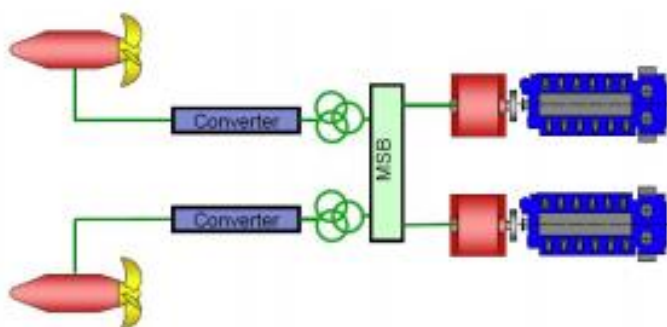


Figura 41, esquema propulsivo diésel-eléctrico

<sup>8</sup> Los PODS son unos propulsores eléctricos que están directamente acoplados a un alternador y se sitúan fueraborda.

- b) También existe la posibilidad de disponer de propulsión eléctrica con línea de ejes y timón, aunque es mucho menos común entre buques semisumergibles debido a la pérdida de maniobrabilidad respecto al primer tipo.

#### **4.1.2.3 Propulsión alternada**

Algunos de los buques también son una mezcla entre los dos sistemas descritos hasta ahora. Es decir, para la propulsión principal tienen un sistema convencional de motor Diesel y hélices de paso fijo. Pero para poder mantener unas condiciones de estabilidad concretas en la mar, también disponen de varios PODS en popa, así como hélices de proa

#### **4.2.2 Justificación del sistema escogido**

Finalmente se opta por instalar un sistema diésel eléctrico con PODS. Este sistema ofrece una serie de ventajas al conjunto propulsivo del buque [43]:

- Ofrece una respuesta de los propulsores mucho más veloz y eficiente que otros sistemas. La potencia se puede distribuir a las distintas hélices fácilmente, de modo que se puede tener un sistema de posicionamiento dinámico<sup>9</sup> como exige la normativa.
- Menor pérdidas por elementos mecánicos, al no necesitar de ejes, reductora ni timón.
- Mejora la maniobrabilidad del buque, algo de vital importancia en las operaciones de carga/descarga de este tipo de embarcaciones. Los PODS tiene la capacidad de girar sobre si mismos 360º, que junto a otros propulsores del buque permite estabilizar el comportamiento en la mar.
- Libertad de situar la cámara de máquinas en cualquier zona del buque. Con el sistema antiguo de motor-eje-timón lo más conveniente sería que esta estuviera situada a popa. Las ventajas son mayor espacio disponible para lastre y mejor reparto de pesos de los equipos.

---

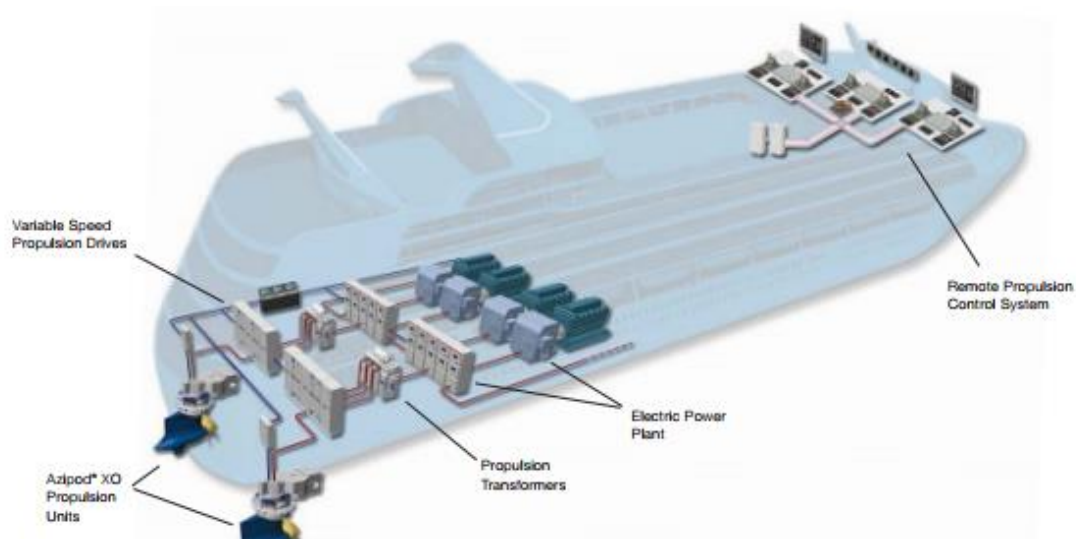
<sup>9</sup> La normativa DNV GL exige a este tipo de buques un sistema de posicionamiento dinámico DP2, que es un sistema informático que analiza las condiciones de viento y marea y ayuda a estabilizar el buque redirigiendo potencia a distintos propulsores.

- Los PODS al ser eléctricos son menos ruidosos, generan menor vibración y son menos contaminantes.

En el mercado de los PODS la empresa más importante es la ABB [47], que ofrece multitud de estos sistemas para diferentes clases de buques.

El sistema escogido también debe cumplir con las exigencias de la normativa DNV GL Pt 5 Ch 10 Sc 5 [58], que establece que este tipo de buques debe dotarse de un posicionamiento dinámico DP2. Siendo el objetivo mantener el buque en una posición fija.

Se dotará al buque de un sistema de propulsores, hélices y timones, que, mediante componentes y sensores de movimiento, viento y corriente, transmitirán la señal de las fuerzas externas al buque a un sistema informático que traducirá estos datos en fuerzas de empuje individuales para cada uno de los propulsores y, así, contrarrestarlas, pudiendo mantener el buque en la posición deseada.



**Figura 42, sistema completo integrado en el buque**

#### 4.2.3 Funcionamiento del sistema diésel-eléctrico con PODS

Los PODS funcionan con un sistema diésel eléctrico de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC), combinando componentes de ambos sistemas y apropiándose de las ventajas de cada uno de ellos.

En el sistema de propulsión global hay una serie de elementos que se encargan de las conversiones pertinentes entre DC y AC.

- El motor diésel está acoplado a un alternador AC que funciona entre 40-60 Hz, en función de la velocidad y carga necesitadas en el momento.
- Unidad de rectificadores para pasar de AC a DC.
- Cuadros de distribución entre los diferentes consumidores de DC.
- En los PODS hay convertidores de frecuencia para adecuar la corriente necesitada por la hélice y convertirla en energía mecánica.

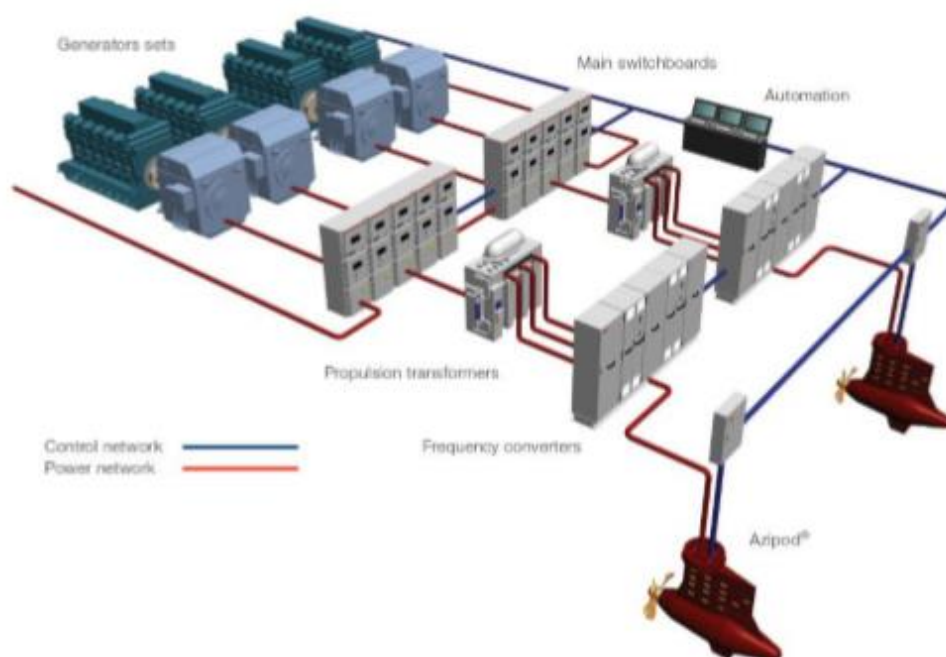


Figura 43, sistema integrado con PODS

### **Procedimiento seguido**

- 1- El proceso de generación de energía empieza en los generadores, que consumen diesel para producir energía eléctrica. Se trata de motores diesel acoplados a generadores, que mediante un sistema electromagnético transforma la energía mecánica del movimiento en eléctrica.
- 2- El sistema eléctrico del buque, compuesto de transformadores, cuadros de distribución, inversores, convertidores etc... se encarga de la distribución de la energía entre los diferentes consumidores.
- 3- Los cuadros de distribución reparten la energía en función de la demanda en cada situación de operación del buque y el resto de elementos adecuan el voltaje y la frecuencia en función del equipo al que vaya destinado.
- 4- Los Pods transforman la energía eléctrica de nuevo en mecánica para propulsar el buque.

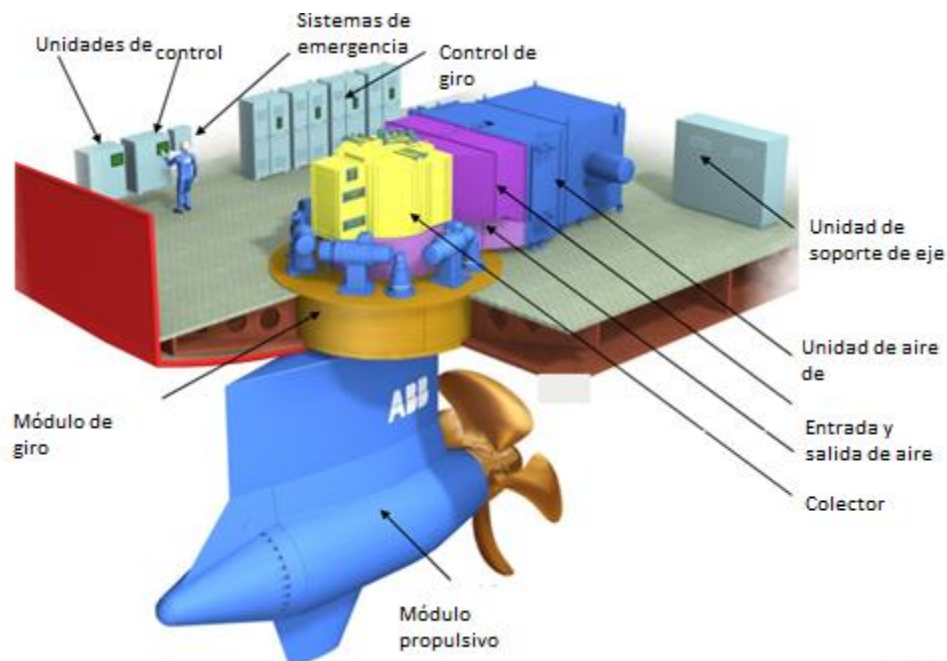
#### **4.2.4 Funcionamiento y elementos de los PODS**

Hasta ahora se ha visto como se produce la energía y se distribuye por los distintos consumidores, entre ellos los PODS de popa, encargados de impulsar el buque. Los motores que forman parte del sistema propulsivo son, en realidad, muy complejos, por lo que se procede a explicar brevemente sus elementos y su funcionamiento.

Cada PODS consta de 3 partes diferenciadas:

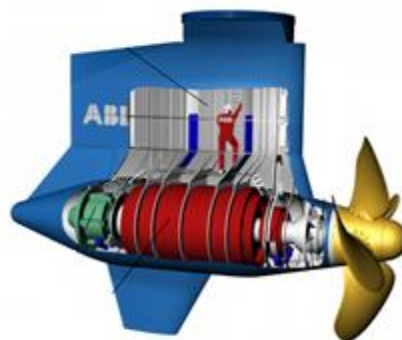
- Módulo propulsivo, formados por el conjunto hélice-motor.
- El módulo de dirección, que permite rotar el sistema 360°.
- La sala de máquinas, que contiene todos los elementos de control de los distintos sistemas que integran el POD.





**Figura 44, esquema típico de un POD**

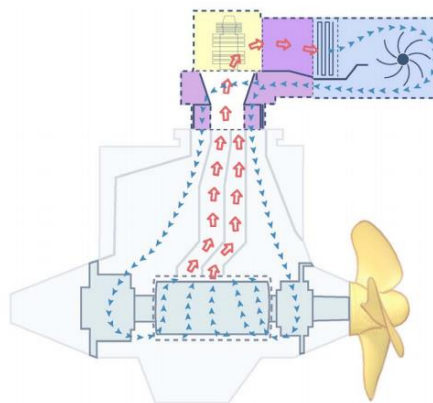
El módulo de propulsión consta del motor síncrono y el eje acoplado a la hélice, que se encarga de modular la rotación del eje en función de la corriente alterna suministrada.



**Figura 45, motor síncrono fueraborda**

El resto de los equipos y elementos que conforman el conjunto son unidades de control de electricidad, control de giro, interruptores de emergencia...

La parte inmediatamente superior del módulo de giro es la que encarga de la refrigeración del motor. Esta consta de dos intercambiadores de calor, que enfrían aire de un circuito cerrado de refrigeración.



**Figura 46, sistema de refrigeración**

Todos estos sistemas se pueden controlar desde el puente de mando gracias a una interfaz como la que se muestra en la siguiente imagen:



**Figura 47, control de los PODS desde el puente de mando**

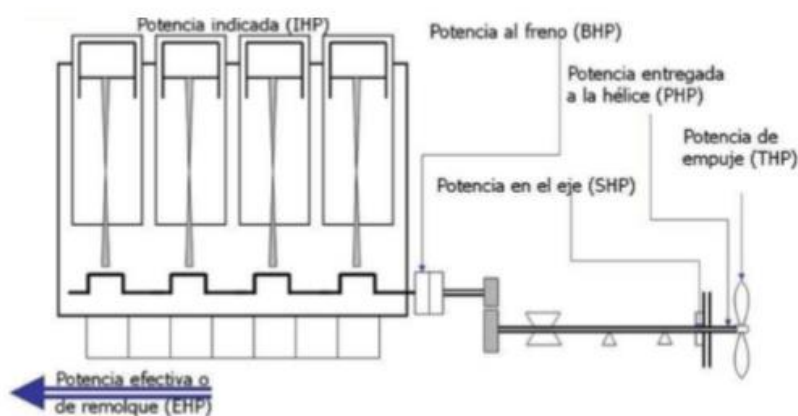
### 4.3 Cálculos relativos a la potencia y propulsión

El valor de potencia y resistencia hallados anteriormente se función de la velocidad deseada y de la carena del buque.

Es decir, se debe encontrar el valor de las pérdidas de energía desde que se genera hasta que se emplea para avanzar. En otras palabras, se debe calcular el rendimiento.

$$DHP = \frac{EHP}{\eta_p} \quad (25)$$

El rendimiento total se obtiene del producto de los distintos tipos de rendimientos que se puede encontrar en el sistema de propulsión de un buque.



**Figura 48, rendimientos aplicables al sistema de propulsión tradicional.**

El rendimiento total aplicado al sistema de propulsión se obtiene de la multiplicación de los rendimientos individuales entre ellos.

$$\eta_p = \eta_o * \eta_h * \eta_{rr} * \eta_m \quad (26)$$

dónde:

- $\eta_o$  es el rendimiento en aguas libres.

- $\eta_h$  es el rendimiento del casco del buque.
- $\eta_{rr}$  es el rendimiento relativo-rotativo.
- $\eta_m$  es el rendimiento mecánico.

Se añadirán algunas modificaciones en los cálculos de los rendimientos debido al sistema de transmisión eléctrico, no mecánico, del buque.

- Se tendrá en cuenta que también hay pérdidas desde la generación de Kw del motor diésel a su conversión en Kwe en el alternador.
- Se obviarán las pérdidas mecánicas debidas a ejes y piezas, tomando un valor de 97%.

#### 4.3.1 Cálculo de los rendimientos

A continuación, se procede al cálculo de todos los rendimientos comentados anteriormente.

##### 4.3.1.1. Rendimiento de casco

El rendimiento del casco  $\eta_h$  depende de los coeficientes propulsivos de estela ( $w$ ) y de succión ( $t$ ).

$$\eta_h = \frac{(1-t)}{(1-w)} \quad (27)$$

El coeficiente de estela es un valor que relaciona la velocidad de avance real del buque y la velocidad a la que realmente llega el agua al propulsor, su valor se puede estimar según las fórmulas de Holtrop, disponibles en la referencia [32].

$$w = 0.3095 * Cb + 10 * Cv * Cb - 0.23 * \frac{D}{T*B} \quad (28)$$

El coeficiente de resistencia viscosa ( $Cv$ ) se obtiene de los datos que proporciona *el proyecto básico del buque mercante* [26].

$$Cv = (1 + k)CF + CA \quad (29)$$

El coeficiente (1+K) viene dado por la expresión siguiente:

$$1 + k = 0.93 + 0.4871 * C * \left(\frac{B}{Lfl}\right)^{1.0681} * \left(\frac{T}{Lfl}\right)^{0.4611} * \left(\frac{Lfl}{RUNL}\right)^{0.1216} * \left(\frac{fL^3}{\nabla}\right)^{0.3649} * (1 - Cp)^{-0.6042} \quad (30)$$

$$C = 1 + 0.011 * Cstern \quad (31)$$

Dónde:

- *Cstern*: 10 para las formas de popa de este buque.

$$RUNL = \frac{Lfl}{1 - Cp + \left(\frac{0.06 * Cp * LCB}{(4 * Cp) - 1}\right)} \quad (32)$$

$$CF = \frac{0.075}{((\log RN) - 2)^2} \quad (33)$$

$$RN = Lpp * \frac{V}{Vc} \quad (33)$$

$$CA = 0.006 * (Lfl + 100)^{-0.16} - 0.0025 + 0.003 * \left(\frac{Lfl}{7.5}\right)^{0.5} * Cb^4 * C2(0.04-C4) \quad (35)$$

Dónde:

- C2: vale 1 cuando la embarcación no tiene bulbo

- C4: toma el valor de 0.04 cuando  $T/Lfl > 0.04$

Se aplican las formulas vistas hasta ahora para halla el coeficiente de resistencia viscosa, y así se obtiene el valor del coeficiente de estela.

$$Cv = (1.4167) * 0.001522 + 0.000374$$

$$Cv = 0.00253$$

Con los datos obtenidos ya se puede calcular el coeficiente de estela del buque.

$$W = 0.3095 * Cb + 10 * Cv * Cb - 0.23 * \frac{D}{T * B}$$

$$W = 0.2112$$

El coeficiente de succión (t) describe la reacción de la hélice sobre la carena. Se produce una succión que aumenta la resistencia al avance, ya que el flujo de agua incrementa su velocidad y aumenta la fricción con el casco[32].

$$t = 0.325 * Cb - 0.1885 * \frac{D}{T * B} \quad (36)$$

$$t = 0.2438$$

De modo que el rendimiento del casco se puede estimar como:

$$\eta_h = \frac{(1 - 0.2438)}{(1 - 0.2112)} = 0.958$$

#### 4.3.1.2 Rendimiento relativo-rotativo

El rendimiento relativo rotativo es aquel que se aplica por la existencia de piezas que tienen movimiento circular, y su valor se puede expresar con la fórmula explicada en “El proyecto básico del buque mercante” [26].

$$\eta_{rr} = 0.9922 - 0.05908RAD + 0.07424(Cp - 0.0225Xb) \quad (37)$$

El valor para buques de 2 hélices suele estar entre 0.95-1. Se obtiene de la relación entre el rendimiento en aguas libres, la potencia de empuje y la potencia entregada a la hélice.

$$\eta_{rr} = 1.017$$

Por lo que se tomará el valor de 1.

#### 4.3.1.3 Rendimiento mecánico

El rendimiento mecanico( $\eta_m$ ) se tomará del 97% debido a que las pérdidas mecánicas son mínimas, ya que el sistema es principalmente eléctrico con pocos elementos físicos en contacto ente sí.

#### 4.3.1.4 Rendimiento en aguas libres

El valor del rendimiento en aguas libres ( $\eta_o$ ) depende de la hélice. Es necesario, pues, estimar un rendimiento  $\eta_o$  aproximado, que nos permita calcular la potencia total necesaria instalada a bordo.

Para este tipo de buques se puede estimar que el rendimiento en aguas libres de la hélice ronda el 65%.

<b>Aguas libres</b>	0.65
<b>Casco</b>	0.958

<b>Mecánico</b>	0.97
<b>Relativo-rotativo</b>	1.017

**Tabla 12, rendimientos iniciales tomados**

Una vez dimensionados los motores y los propulsores se podrá proceder al calculo del rendimiento real en aguas libres  $\eta_o$  . Para ello se usará la hoja de Excel proporcionada en la asignatura *Proyectos y artefactos navales* [22].

#### 4.3.2 Elección del propulsor

En primer lugar se debe calcular el empuje que realiza cada uno de los propulsores, en este caso en buque consta de dos. Por lo que el resultado deberá dividirse entre cada uno de ellos. El valor total del empuje, de acuerdo con “Ship practical design”[23], toma el valor de la siguiente fórmula.

$$T = \frac{R_{st}}{1-t} \quad (38)$$

Dónde:

- t: coeficiente de succión de 0.2438.
- $R_{st}$ : Resistencia obtenida a velocidad máxima, de 729 KN.

$$T = \frac{729}{1 - 0.2438} = 964.13 \text{ KN}$$

$$T = \frac{964.13}{2} = 482.065 \frac{\text{KN}}{\text{prop}} \quad (39)$$

Con tal de suministrar el empuje, y sabiendo la velocidad de avance( $V_a$ ) del buque (m/s), se puede estimar la EHP requerida.

$$V_a = V * (1 - w) \quad (40)$$

$$EHP = T * V_a \quad (41)$$



$$EHP = \frac{5085.52}{2} = 2543.76 \text{ Kw}$$

Recordemos, que el valor obtenido de los cálculos de *Maxsurf Resistance* [41] era de 4875.073 Kw. Se tomará el calculado anteriormente por ser mayor.

Para poder escoger un propulsor adecuado, se debe calcular DHP, de modo que así se pueda ir a la página de fabricantes de PODS y escoger el modelo que más se ajuste. Para ello se toma el valor del rendimiento en aguas libres estimado del 65%, que es un valor coherente con este tipo de buques.

$$DHP = \frac{\text{Potencia}}{\eta_t} \quad (42)$$

Dónde:

- $\eta_t$ : Es la multiplicación de todos los rendimientos calculados hasta el momento.

$$DHP = \frac{EHP}{\eta_o * \eta_{rr} * \eta_h * \eta_{me}} = 4211.39 \text{ Kw}$$

$$DHP = \frac{2543.76 \text{ Kw}}{0.65 * 1 * 0.95 * 0.97} = 4211.39 \text{ Kw}$$

Se le debe añadir un 10% de margen debido a que el motor nunca trabajará al 100% de capacidad, sino al 90%. Esto se conoce como MCR (Máximo continuos rating).

$$DHP = 4632.52 \text{ KW}$$

Con la potencia entregada a la hélice obtenida, se ha entrado en la página web de ABB [47] para poder determinar que propulsor se adapta mejor a las necesidades.

#### 4.3.2.1 Información del fabricante

EL catálogo consta de 4 tipos distintos de PODS:

- Azipods compactos (C) que puede llegar a desarrollar hasta 4500 KW.



**Figura 49, variante CO**

- Azipod compactos de 2ª generación(D) de hasta 7500 Kw.



**Figura 50, variante DO**

- Azipod conocidos como clásicos (V) que generan hasta 25 MW.



**Figura 51, variante VI, para rompehielos**

- Azipods de última generación (X) que también generan hasta 25 MW.



**Figura 52, Azipods de última generación de amplias aplicaciones**

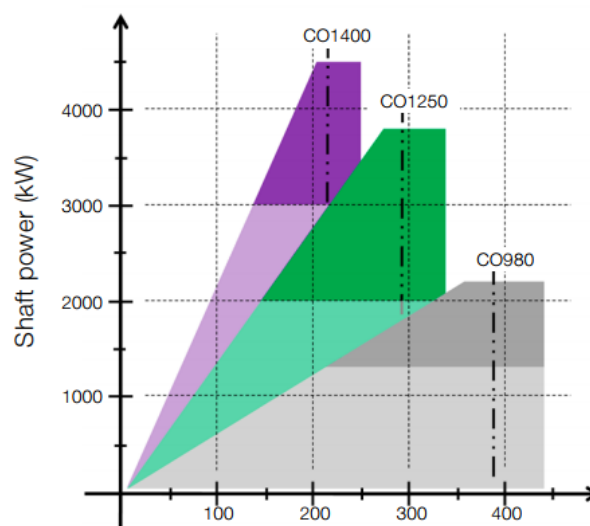
Además, estas categorías se subdividen en función de si se han diseñado para navegación en aguas abiertas (O)<sup>10</sup>, para aguas heladas(I) o retráctiles (Z).

---

<sup>10</sup> La versión de Azipod O será la más adecuada ya que el buque proyecto está destinado a realizar viajes por aguas abiertas.

Dada las condiciones de operación de nuestro buque, se opta entre dos modelos que pueden adaptarse bien a las necesidades, tanto a la potencia requerida, como al empuje, como a las revoluciones aproximadas a las que rotará el sistema.

- CO 1400, que desarrolla una potencia de hasta 4500 Kw.
- XO 1600, que puede desarrollar hasta 10000 Kw.



**Figura 53, potencia entregada en función de las revoluciones**

En la imagen se puede apreciar como la variante CO1400 llega a las 4500 KW de potencia en el eje a más de 200 rpm.

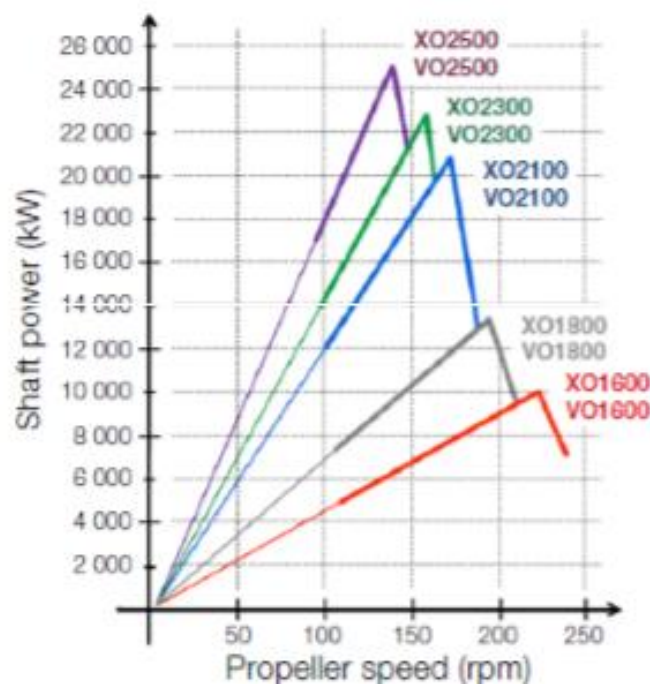


Figura 54, potencia-revoluciones de la variante XO

Tras comprobar las especificaciones de cada uno de ellos se descarta el CO 1400 por varios motivos:

- Solamente admite un máximo diámetro de 4 metros de hélice, y la inmersión que permite no es lo suficientemente óptima para el trabajo sin cavitación<sup>11</sup>.
- A más de 200 rpm no es posible evitar la cavitación del conjunto.

Por otro lado, las dimensiones y especificaciones de la versión XO1600 se ajustan más que cualquiera de sus alternativas.

De modo que se tomarán las especificaciones de POD XO1600 para poder calcular el  $\eta_o$ .

---

<sup>11</sup> La cavitación es un fenómeno que se produce en las hélices cuando rotan a velocidad excesiva por el cual se producen burbujas de vapor en las palas con la consecuente pérdida de empuje efectivo.

Parámetro	Min	Max	Unidades
Diámetro de la hélice	3.3	4.7	m
Distancia casco-eje hélice	3.3	4.7	m
Distancia eje giro-popa	5	5	m
Angulo de trabajo	0	10	º
Bloque de montaje	1.02	1.09	m
Régimen de trabajo	100	150	rpm
Altura total	9	11	m

**Tabla 13, características de la hélice**

Como se puede apreciar en las anteriores características del propulsor seleccionado, permite un cierto rango de adaptabilidad a las formas de popa, ya que algunos parametros varían en función del deseo del cliente.

Con tal de conseguir el mínimo valor de cavitación posible, y que se cumplan los requisitos de los huelgos propuestos por DNV [5], se ha recurrido al software autoCAD [36] para colocar el propulsor en la popa del buque y así comprobar distancias.

#### 4.3.2.2 Cálculo de huelgos

Las expresiones que nos permiten calcular los huelgos entre hélice y casco se obtienen de DNV Pt.3 Ch.3[70]. Dado que los huelgos admisibles entre las hélices y los elementos circundantes dependen a su vez del diámetro de la misma, se ha realizado un proceso iterativo partiendo del diámetro mayor admisible (que ofrece mejores prestaciones) para poder encontrar el propulsor que mejor se ajuste. Los huelgos calculados son los siguientes:

$$Distancia\ y = (0.3 - 0.01 * z) * D = 1222\ mm \quad (43)$$

$$Distancia\ x = (0.7 - (0.04 * z)) * \left(\frac{D}{2}\right) = 1269\ mm \quad (44)$$

$$Distancia\ LB = 0.035 * (D/2) = 87.5\ mm \quad (45)$$

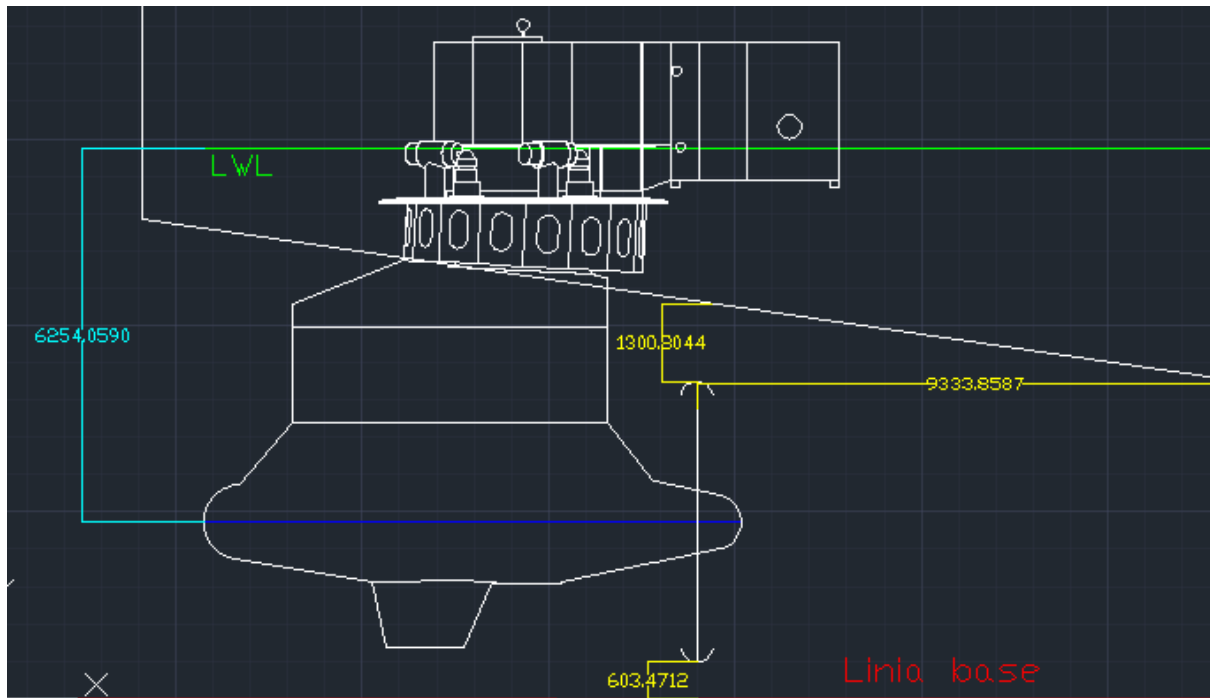


Figura 55, huelgos en la popa con la hélice escogida

Tomando el máximo diámetro de la hélice admisible para este motor (4.7 m) y la máxima distancia vertical posible se obtiene los valores calculados, y, como se aprecia en la imagen, cumple los requisitos.

#### 4.3.2.3 Cálculo de relación de keller

Una vez se tiene las dimensiones y la situación en popa del propulsor escogido, se procede al calculo de la relación  $A_e/A_o$ . Esta valor se conoce comola relación area-disco del propulsor y nos permite encontrar un parámetro que optimiza la inclinación del area de las palas para evitar al máximo la cavitación.La expresión proviene de Holtrop[33].

$$\frac{A_e}{A_o} = \frac{1,3+0,3*Z*T}{1026*h+10100*D^2} + 0,2 \quad (46)$$

Dónde:

- Z es el numero de palas.
- T es el empuje calculado anteriormente.
- D es el diametro de la hélice propuesto.
- H es la inmersión de la hélice.

Para este tipo de buques, el numero de palas de las hélices suele ser 3 o 4, de modo que se calcula para los dos casos.

Z	Ae/Ao
3	0.571
4	0.6359

**Tabla 14, relación área de las palas con la del círculo formado por el diámetro para 3 y 4 palas**

#### 4.3.2.4 Cálculo del rendimiento real en aguas libres

El rango de validez de las series B de Wageinenene son:

Número de palas	2	7
AE/Ao	0.3	1.05
PD	0.5	1.4

**Tabla 15, rangos de validez para las series B**



Con todos los parametro ya calculados y verificada su valiez, se introducen los valores en el excel donde se dispone de la herramienta solver para encontrar el rendimiento en aguas libres, el numero de revoluciones por minuto y la elación paso-diametro (PD).

<i>Datos de la hélice</i>		<i>Datos del buque</i>	
AE/AO	0.540	R	552.4 kN
Z	4	t	0.24
D	5.40 m	w	0.210
P/D	0.811	$\eta_m$	0.990
n	119.2 rpm	$\eta_{rr}$	1.000
$K_T$	0.1646	V	14 kn
T	552.4 KN	T	552.4 kN
$K_Q$	0.0222	<i>Propiedades físicas</i>	
Q	403.2 KN·m	$\rho$	1000.000 kg/m3
J	0.530	$\mu$	0.00102 Pa·s
$\eta_0$	0.6244		
$C_{0.75}$	1.4996 m		
$V_{0.75}$	26.3 m/s		
Rn	3.86E+07		
BHP	5084.6 kW		

Figura 56, series B de Wageningen

Los datos de entrada son los siguientes:

<b>T(KN)</b>	<b>482</b>
<b>R(KN)</b>	364.5
<b>w</b>	0.211
<b>t</b>	.02438
<b>Hrr</b>	1
<b>Hm</b>	0.98
<b>D(m)</b>	4.7
<b>Z</b>	3/4
<b>AE/Ao</b>	0.57/0.63

Los resultados obtenidos para 3 y 4 palas en la hélice se muestran a continuación:

	3	4
$\eta_o$	0.584	0.586
$P/D$	0.7	0.768
$n$	159	143

**Tabla 16, resultados obtenidos de las series B**

Finalmente se ha escogido el Azipod XO1600 de 4 palas.

#### 4.4 Cálculo de potencia de los motores

La potencia útil efectiva ya se ha calculado en anteriores apartados. A continuación, se le aplicarán los rendimientos para poder dimensionar los generadores principales.

$$EHP = 5085.27 \text{ Kw}$$

$$DHP = \frac{EHP}{(\eta_h * \eta_o * \eta_{rr})} = 9058.38 \text{ Kw} \quad (47)$$

La potencia obtenida es la que llega a los PODS, pero hay que aplicarle todavía el rendimiento mecánico, el del alternador y el eléctrico.

Los rendimientos eléctricos y del alternador vienen dados por el propio fabricante. Toman un valor de 0.94.

$$P_{diesel} = \frac{DHP}{\eta_m * \eta_e * \eta_{al}} = 9919.64 \text{ kw} \quad (48)$$

Por otra parte, se debe tener en cuenta que el buque se dotará de dos hélices transversales a proa, de modo que se requerirá más potencia a instalar.

En condiciones de navegación, y con una carga a transportar sobre cubierta, las fuerzas que se tienen en cuenta para el dimensionamiento de la potencia de los propulsores transversales de proa son la del viento y la de la corriente. Según el DNV, Environmental conditions and environmental loads[69], se estiman dichas fuerzas como:

$$F_v = \frac{1}{2} * \rho_a * V_v^2 * C_v * A_v \quad (49)$$

$$F_c = \frac{1}{2} * \rho_{sw} * V_c^2 * C_c * A_c \quad (50)$$

Dónde:

- $\rho$ : Es la densidad del aire y del mar, con valores de 1.226 Kg/m<sup>3</sup> y 1025 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.
- $V$ : es la velocidad máxima crítica según condiciones de operación. Se tomará 20 nudos para la velocidad del viento y 1 nudo para la corriente.
- $A$ : es el área lateral proyectada.
- $C$ : son coeficientes del aire y de la corriente, son 0.9 y 0.7 respectivamente.

Los cálculos del área lateral proyectada se han hecho mediante el software AutoCAD [36], y se ha tenido en cuenta que el buque carga una estructura de 100 metros de eslora y 25 metros de alto.

$$F_v = 209.14 \text{ KN}$$

$$F_c = 137.48 \text{ KN}$$

El empuje que deberán suministrar las hélices de proa ya se puede calcular, ya que será el necesario para contrarrestar las fuerzas de viento y corriente juntas.

$$T = 346.62 \text{ KN}$$

Según el DNV Pt6 Ch 7:

$$T = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * (D * P)^{\frac{2}{3}} (KN) \quad (51)$$

Dónde:

- El producto de los rendimientos ( $\eta$ ) es 90% para hélices en túneles.
- El diámetro máximo(D) admisible se cifra en 2.6 m, ya que los túneles de las hélices estarán colocados bajo el doble fondo del buque.
- Se añade un rendimiento del 90% a la efectividad del empuje de las hélices debido a la proximidad entre ellas y las pérdidas eléctricas.
- 

Se obtiene la potencia total necesaria, que se divide entre 2 dado que se instalarán dos túneles de proa.

$$P = \frac{3668.9}{2} = 1844.26 \frac{kw}{hélice} (potencia diiesel) \quad (52)$$

La potencia total demanda por los propulsores de popa y los de proa será la suma de ambos

$$P_{tot} = P_{diiesel} + P * 2 \quad (53)$$

$$P_{tot} = 13608.17 Kw$$

## 4.5 Elección de las hélices secundarias

Para las hélices de proa, se han escogido el modelo de Wartsila Wtt-18, que consta de las siguientes características.

<b>Potencia</b>	2100	Kw
<b>Diámetro</b>	2600	M
<b>Largo del túnel</b>	2345	M
<b>Peso</b>	14200	t

Tabla 17, datos de las hélices de proa

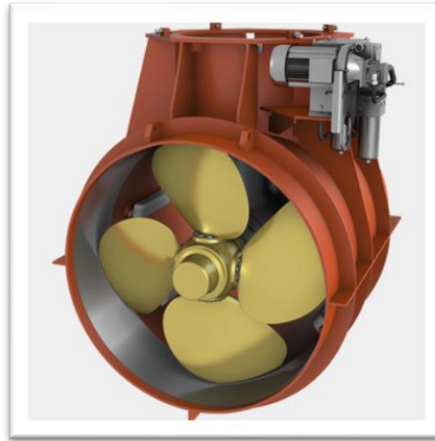


Figura 57, propulsor transversal de proa wartsila [42]

## 4.6 Elección de los grupos generadores

Debido a las altas exigencia de seguridad requeridas para este tipo de buques, se opta por instalar cuatro motores semirápidos Wartsila 9L26, de modo que se consigue mayor seguridad.

Motores principales		
Número	4	
Potencia diésel(KW)	2925	Kw
Potencia eléctrica(KWe)	2810	Kwe
Ancho (m)	2.3	M
Alto (m)	3.16	M
Largo (m)	8.5	M
Peso (t)	50	t

Tabla 18, datos de los motores principales



**Figura 58, motor Wartsila 9L26 [42]**

La potencia total instalada con los 4 diésel-generadores principales es de 11700 Kw. Es menor que la requerida por los dos PODS de popa y por las hélices de proa.

Además, teniendo en cuenta que a bordo habrá más equipos y elementos de consumo eléctrico, se instalarán dos motores auxiliares extra, para cubrir el resto de la demanda.

El resto de la demanda energética, suponiendo que los propulsores de proa y popa funcionarán al 100% de capacidad y al mismo tiempo, sería de 1908.17 KW.

Se instalan dos diésel-generadores wartsila 6L20 con las siguientes características:

Motores auxiliares		
Número	2	
Potencia diésel(KW)	1110	Kw
Potencia eléctrica	1055	KWe
Ancho	1.8	m
Alto	2.3	m
Largo	5.3	m
Peso	14	t

**Tabla 19, datos de los motores auxiliares**



**Figura 59, motor auxiliar Wartsila 6L26 [42]**

Finalmente, la potencia total instalada a bordo del buque proyecto es de 13920 KW.

#### **4.7 Verificación de buen compartamiento de la hélice**

Gracias al software HydroComp NavCad [44] se ha comprobado el porcentaje de cavitación a las distintas velocidades operativas del buque.

El programa permite insertar datos característicos del buque tales como:

- Formas y dimensiones básicas: Eslora, manga, formas de proa y popa, volumen de carena, área mojada y coeficientes adimensionales.
- Condiciones exteriores: Viento y mareas
- Superficies adicionales: Tales como apéndices que sobresalgan como quillas de balance y timones.
- Datos de hélice y motor: Se puede insertar inmersión de palas, velocidad de giro, potencias y rendimientos de los motores, diámetro de palas, relación paso diámetro.

Con este sistema se pueden escoger también los sistemas de calculo que se quieran utilizar, pudiendo escoger entre análisis a tiro fijo, en aceleración o en canal de pruebas. Cabe recalca que el criterio de cavitación escogido es el criterio de Keller “.

Tras realizar el análisis llenando todos los campos de los que se obtiene información, se obtienen los datos de cavitación para diferentes velocidades del buque.

Velocidad (Kn)	Cavitación (%)
6	5.3
8	3.4
10	1.7
12	0.6
13	0.9
14	1.2
16	4.1
18	11.8

**Tabla 20, resultados de cavitación para las velocidades de operación del buque**

De la tabla siguiente se puede observar como los valores aumentan de manera exponencial con el aumento de la velocidad.

Velocidad (Kn)	FN	% cavitación	EHP (KW)	Rendimiento	Empuje (N)
4	0.048	3.6	137.57	0.6542	22287
6	0.072	5.3	441.97	0.6638	47732
8	0.096	3.4	1012.51	0.6705	82012
10	0.120	1.7	1933.04	0.6755	125258
12	0.144	0.6	3349.25	0.6787	180855
14	0.168	0.9	5679.82	0.6782	262893
16	0.192	1.2	10020.42	0.6695	405849
18	0.216	4.1	18610.79	0.6470	669881

**Tabla 21, resultados obtenidos del software NavCad.**



## Capítulo 5. Disposición general

En este capítulo se propone una distribución de los espacios interiores del buque proyecto siguiendo la normativa DNV GL Pt.3 Ch.2 [31], El SOLAS [1], el MARPOL [2] y las normas UNE.

Se calculará el espaciado entre cuadernas, disposición de los mamparos, situación de la cámara de máquinas (y de sus elementos), posición de los propulsores y los tanques de lastre. De un modo más superficial se hablará de equipos y características concretas de este tipo de buques.

Finalmente, en el anexo 6 se puede observar un plano de *Autocad* con las diferentes vistas y cubiertas del buque proyecto.

## 5.1 Consideraciones iniciales

Algunas características de la disposición vienen dadas por todos los cálculos y suposiciones que se han hecho hasta ahora:

- Debido al carácter de operación único de este buque, su volumen interior está constituido casi en su totalidad por tanques de lastre. Eso le permite sumergir la cubierta principal, de cara, por debajo de la línea de flotación. Otro de los motivos es que aporta mucha estabilidad al poder jugar con el centro de masas total del conjunto buque-carga.
- El cuerpo central del buque estará compuesto por 3 niveles de tanques de lastre, en vertical, y 4 en transversal.
- En popa se situarán los PODS junto con sus equipos necesarios, en un compartimento especial para ello.
- En proa se situará la cámara de máquinas, ligeramente desplazada hacia popa para permitir la colocación de las hélices transversales de proa y para disponer de más espacio en los niveles bajos.

El cálculo de tanques de servicios y de espacios de acomodación se hará acorde a las especificaciones del proyecto.

- Autonomía: 15000 Mn
- Personal: 25 personas



Figura 60, ruta de Singapur a Mar del Norte

Típica ruta de un buque de este tipo viaje de Singapur a mar del norte, ida y vuelta sin necesidad de repostar combustible.

## **5.2 Elementos estructurales**

### **5.2.1 Clara entre cuadernas**

Según DNV GL pt.3 Ch.2 [31], la clara entre cuadernas de este tipo de buques oscila entre 550 mm y 650 mm, además, la distancia entre elementos de refuerzo primaria transversales no puede ser superior a 2500 mm para las características del buque proyecto. Por lo tanto, en base a lo estipulado y a la experiencia de otros buques, se toman las siguientes distancias:

- Clara entre cuadernas: 600 mm
- Clara entre bulárcamas: 2400 mm

Una vez determinada la distancia entre cuadernas, el resto de elementos estructurales se colocarán coincidiendo con ellas, de modo que se asegure la continuidad de la estructura y una mayor resistencia. Se empezará a contar cuadernas desde la perpendicular de popa situada a 4.3 metros del espejo de popa.

### **5.2.2 Mamparos estancos transversales**

Según la normativa DNV Part 3 Ch 2 Sc 2 [54], para este tipo de buques y su eslora, el número mínimo de mamparos estancos será de 9. Entre ellos se cuenta el mamparo de proa (o colisión), los mamparos que delimitan la cámara de máquinas y el pique de popa.

#### **5.2.2.1 Pique de proa**

El mamparo más a proa del buque, que generalmente se usa para delimitar tanques de lastre que permitan modificar el trimado de la nave. Este deberá situarse entre unos límites máximos y mínimos.

$$X_{max} = 0.08 * L_f - X_f \quad (54)$$

$$X_{min} = 0.05 * L_f - X_f \quad (55)$$

Dónde:

- $L_f$ : toma el valor del 97% de la eslora al 85% del puntal.
- $X_f$ : es igual a 0 cuando no hay bulbo.

$$X_{max} = 9.1 \text{ m}$$

$$X_{min} = 14.5 \text{ m}$$

De modo que estará entre 9.1 y 14.5 metros.

Situado el origen de nuestro eje de coordenadas en la línea base y a la altura del espejo de popa, el mamparo de colisión se halla entre 181.13 y 176.33 metros.

Finalmente se situará en la cuaderna 294 a una distancia de 180.72 metros del origen.

#### **5.2.2.2. Mamparos de la cámara de máquinas**

Como este tipo de buque tiene una cubierta de carga entre la sección media del buque y popa, para evitar un sobrepeso de la popa, se opta por colocar la sala de máquinas aproada, de modo que el Cg del buque esté lo más centrado posible.

El mamparo de popa de la CM se situará sobre la cuaderna 212 a 131.52 metros del espejo de popa.

El mamparo de proa de la CM se situará sobre la cuaderna 262 a 161.52 metros del espejo de popa.

De este modo la CM tiene una longitud de 30 metros, de acuerdo con los cálculos hechos en el dimensionamiento.

Entre el mamparo de proa de la CM y el mamparo de colisión se colocarán tanques de lastre y los propulsores de proa.

### 5.2.2.3 Pique de popa

Se trata del mamparo estanco más cercano a popa, que al igual que el de proa, delimita también tanques de lastre que sirven para controlar el porcentaje de trimado del buque. Además, deberá garantizar espacio suficiente para los PODS que se instalarán.

Si sitúa a 14.5 metros del origen de coordenadas, sobre la cuaderna 17.

### 5.2.2.4 El resto de los mamparos estancos

El resto de los mamparos se colocan de manera equidistante a lo largo del espacio restante, haciéndolos coincidir con las cuadernas.

$$Distancia = \frac{136.82}{7} = 19.54 \text{ m} \quad (56)$$

Pique de popa	17	14.5	14.5
2	50	34.04571429	34.3
3	82	53.59142857	53.5
4	115	73.13714286	73.3
5	147	92.68285714	92.51
6	180	112.2285714	112.31
Popa CM	212	131.7742857	131.52
Proa CM		161.52	161.52
Pique de proa	295	180.72	180.72

**Tabla 22, disposición de los mamparos transversales**

### 5.2.3 Mamparos estancos longitudinales

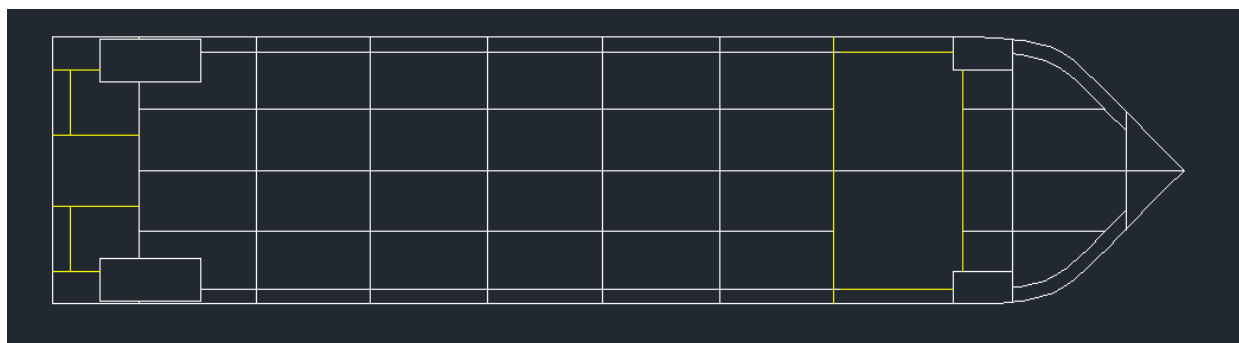
A lo largo de toda la eslora de carga, se situará un mamparo longitudinal en crujía desde el pique de popa hasta el mamparo de popa de la cámara de máquinas que separará los costados del buque de manera simétrica. De la siguiente manera:

	Inicio	Fin	
<b>Media manga</b>	0	10	m
<b>Doble costado</b>	10	20	m
<b>Costado</b>	20	22.44	m

**Tabla 23, disposición de mamparos longitudinales**

El doble costado se extenderá desde el pique de popa al pique de proa, con una amplitud constante de 2.44 m.

Desde el mamparo de proa de la CM hasta pique de proa, la subdivisión se desarrollará del mismo modo que en el cuerpo central del buque.



**Figura 61, disposición de mamparos longitudinales y transversales**

## **5.2.4 Disposición de las cubiertas**

### **5.2.4.1 Doble fondo**

Según las normas de DNV GL[5], el doble fondo deberá tener una altura mínima dada por la siguiente formula.

$$H = 1000 * \frac{B}{20} \quad (57)$$

Dada la necesidad de tener un Cg bajo, y de alojar propulsores transversales de proa, se fija la altura del doble fondo en 3000 mm, desde el pique de proa hasta la popa.

### **5.2.4.2 Cubierta 2ª**

Esta cubierta se encuentra a 10 m de la línea base en el cuerpo central del buque, formando tanques de lastre altos en la sección media. En la sala de máquinas se encuentra a una altura de 7.75 metros, dividiendo en dos la altura de la CM.

### **5.2.4.3 Cubierta de carga/principal**

Se haya a lo largo de toda la cubierta de carga, a una altura de 12.51 m desde la línea base. Es donde se coloca la carga a transportar. En proa, ésta cubierta divide tanques de lastre inferiores con los superiores de debajo de la superestructura.

### **5.2.4.4. Cubierta intermedia 1ª**

Se dispondrá a media distancia entre cubierta intermedia 2ª y la principal. Su principal función es la de delimitar tanques de lastre, ya que, de otro modo, si no se dispusiera de esta cubierta, la proa contaría con tanques de lastre demasiado grandes. Esto podría dificultar luego la precisión del lastrado y deslastrado del buque.

#### 5.2.4.5 Cubierta intermedia 2º

Se dispondrá a media distancia entre cubierta superior y la intermedia 1º. Al igual que la anterior también delimita tanques de lastre, pero, además, es dónde se apoyarán algunos elementos de amarre y fondeo, como las cajas de cadenas y molinetes.

#### 5.2.4.6 Cubierta superior

Ésta cubierta se ha posicionado a una altura suficiente para cumplir los criterios de la sociedad de clasificación de reserva de flotabilidad adecuada en inmersión.

Según la normativa, el volumen estanco que encierra tanto proa, como popa al máximo calado debe ser mayor que el 1.5%, y en total debe superar el 4.5%.

Los volúmenes se calculan gracias al software *Maxsurf Stability* [62].

Volumen casings: 2487.66 m3

Volumen proa: 3441.26 m3

Volumen total estanco: 107748.24 m3

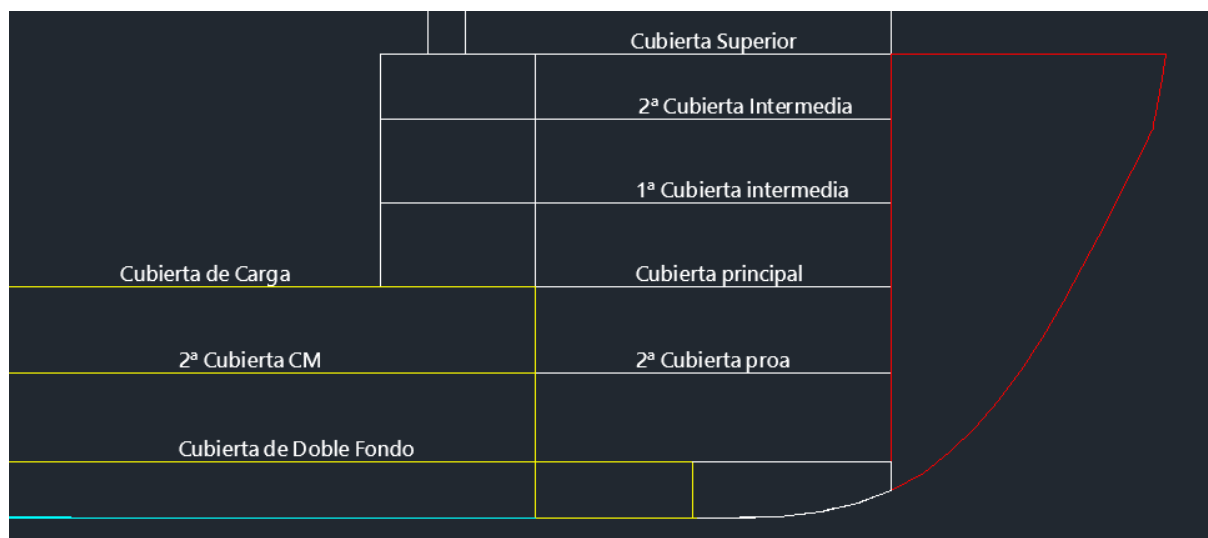
Volumen a Max. calado: 101819.31 m3

Con una altura estimada de 25 m, las normas anteriormente descritas se cumplen.

$$\frac{V_{castillo}}{V_{total}} > 1,5\%$$

$$\frac{V_{castillo}}{V_{total}} = 4.55\% \quad (58)$$





**Figura 62, disposición de las cubiertas en proa**

#### **5.2.4.7 Cubiertas de superestructura**

Las cubiertas de la superestructura se destinarán a puente de mando y habilitación de la tripulación. Se dotará al buque de 5 niveles de una altura de 2.85 metros cada uno.

Las dimensiones finales de la superestructura son las siguientes:

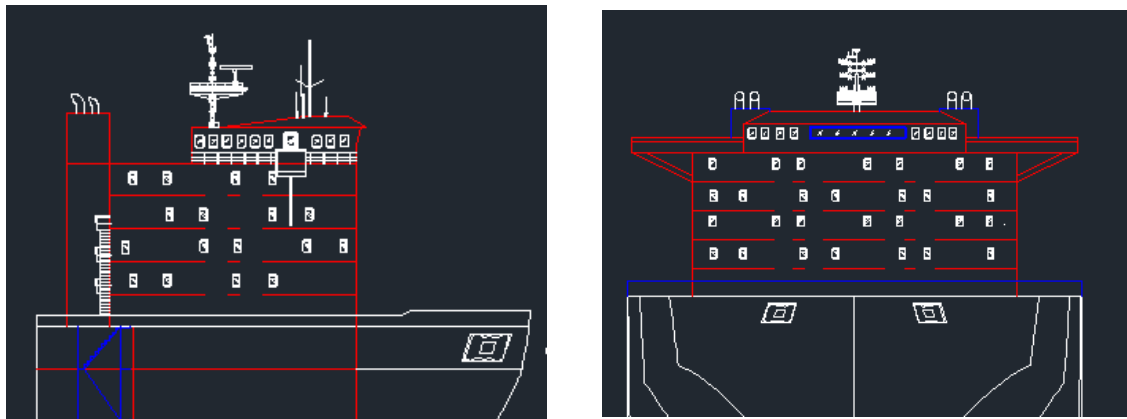
$$B=32 \text{ m}$$

$$H=14.25 \text{ m}$$

$$L=25 \text{ m}$$

#### **5.2.4.8 Puente de mando**

El puente de mando se sitúa justo encima de la cubierta superior, entre los 39 m y 42 m respecto la línea base. Desde esta localización se obtiene una buena visión, tanto de la cubierta de carga para controlar las operaciones de carga y descarga como del horizonte en condiciones de navegación.



**Figura 63, disposición de las cubiertas de la superestructura**

En la siguiente imagen se puede apreciar la localización del puente de mando respecto a la cubierta de carga. Nótese que desde el puente de mando se dispone de unas extensiones a ambos costados del buque que permiten controlar Babor y Estribor sin abandonar el puente.



**Figura 64, croquis del perfil de la embarcación**

## 5.3 Disposición de los espacios

### 5.3.1 Cámara de máquinas

La cámara de máquinas se situará entre las cuadernas 212 y 262, con una longitud total de 30 metros.

Se dividirá en dos niveles equidistantes, con una altura máxima de 12.51 m, coincidiendo con la cubierta de carga. En el nivel inferior se colocan los elementos principales y en la parte superior elementos secundarios y talleres y salas de reparación.

Se ha decidido emplazarla en estos puntos para evitar las zonas más estrechas de proa y también para disponerla lo más cerca de Cg del buque, aumentando su estabilidad y no requiriendo un uso excesivo de tanques de lastre.

A los costados se dispone de tanques de lastre con una amplitud de 2.44 m.

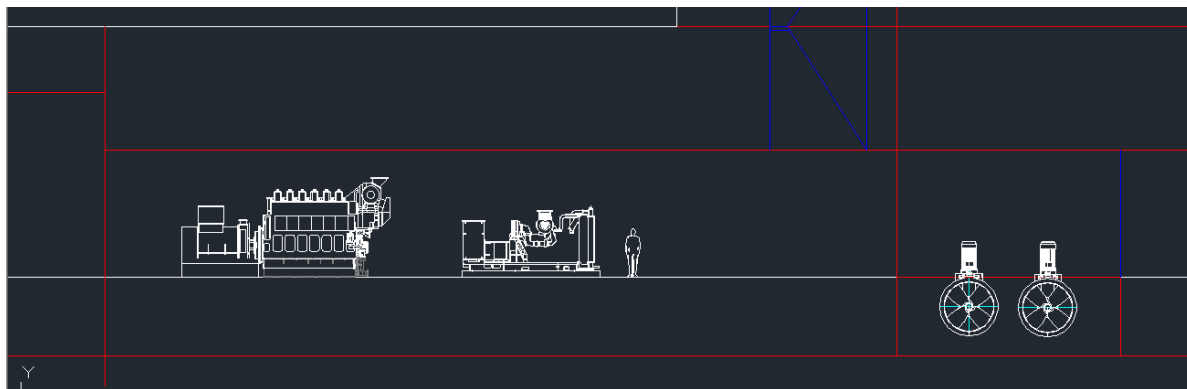


Figura 64, sala de máquinas a proa

#### 5.3.1.1 Elementos de la cámara de máquinas

En la cámara de máquinas se encuentran los elementos más importantes para la operación y correcto funcionamiento del buque.

Entre ellos se ha distribuido los siguientes:

- Motores principales
- Motores secundarios/auxiliares
- Bombas de lastre
- Tuberías de exhaustación de gases
- Taller de la sala de maquinas
- Local de bombas y purificadoras
- Sala de control
- Tanques de agua dulce
- Tanques de combustible
- Tanques de aceites
- Espacio destinado a escalera de comunicación entre sala de máquinas y superestructura.



Figura 65, a la izquierda el nivel inferior. A la derecha el nivel superior de la CM.

### 5.3.2 Propulsores principales y salas de control

Los propulsores principales del buque, diseñados en el anterior capítulo, se sitúan a popa, entre el espejo de popa y el pique de popa.

A lo ancho de la manga están colocados simétricamente respecto crujía entre los 6m y los 17m.

Verticalmente ocupan todo el espacio disponible por las formas de popa del buque y la cubierta de carga.

Es importante disponer de espacio suficiente para alojar todos los sistemas de control de los PODS especificados por el fabricante.

Para acceder a las Cámaras se podrá hacer a través de escotillas estancas situadas en la popa.

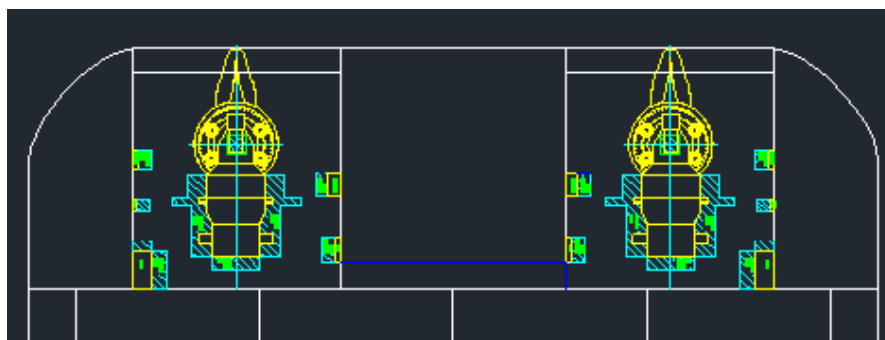


Figura 66, locales de propulsión y PODS de popa

### 5.3.3 Hélices transversales de proa

Se disponen entre el mamparo de proa de la CM y el pique de proa, en 172 y 175 m respecto el espejo de popa.

Para acceder al local, se hace a través de escotillas estancas con la sala de máquinas.

#### **5.3.4 Amarre y fondeo**

Tanto a proa como a popa, se dispondrá de elementos como anclas, cadenas, bitas y molinetes. En proa se sitúan sobre la cubierta de la intermedia y superior.

Los equipos de popa se encuentran en los mismos *casings* donde se sitúan los tanques de lastre.

#### **5.3.5 Habilitación**

Como se ha comentado anteriormente, constará de 5 niveles de 2,85 m de alto, con una manga de 32 m y una eslora de 25m (desde 156 a 181). El espacio debe ser el suficiente para dar cabida a los 25 tripulantes del buque.

Las distribuciones de los espacios interiores se han hecho de acuerdo con el SOLAS [1], respetando espacios mínimos, ancho de pasillos, criterios de seguridad contra incendios, iluminación, espacios comunes...

##### **5.3.5.1 Cubierta 1ª**

Se accede por la cubierta superior, y se hallan elementos para la correcta operación de la vida a bordo como la estación contraincendios, enfermería, despensas, basura, lavandería, duchas...

##### **5.3.5.2 Cubierta 2ª**

Se encuentran las zonas comunes de la tripulación, tales como la cocina, comedor, espacio de ocio y cuartos de limpieza, vestuarios y baños.

##### **5.3.5.3 Cubierta 3ª**

Hay camarotes para los tripulantes de menor rango dentro del buque, sala de descanso y servicios.

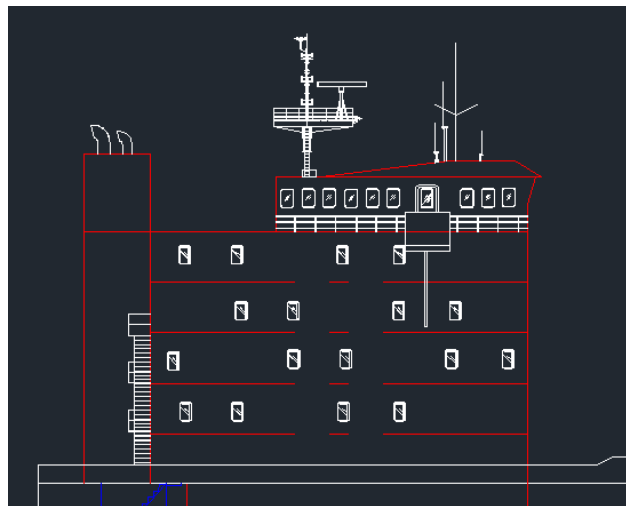
#### 5.3.5.4 Cubierta 4ª

Dispone de más camarotes de tripulación y algunos camarotes de oficiales. También hay oficinas.

#### 5.3.5.5 Cubierta 5ª

Camarotes para los más altos oficiales dentro del buque, como el capitán, el oficial de máquinas, el ingeniero de operaciones marítimas, y en ocasiones, el cliente.

Además, consta de servicios, sala privada de reuniones y algunos servicios extras.



**Figura 67, cubiertas de habitación y puente de mando**

#### 5.3.6 Casings de popa

Se trata de unos volúmenes de reserva de flotabilidad situados a popa y simétricamente respecto crujía. Consta de tanques de lastre, grúas auxiliares, escalera para desplazarse verticalmente y espacio para elementos de amarre.

Sus dimensiones son las siguientes:

$$X=17 \text{ m}$$

$$Y=7.2 \text{ m}$$

$$Z=19.5 \text{ m}$$

Recordemos que el volumen que encierran los *casings* de popa por encima de la línea de máximo calado, debe superar el 1.5% respecto al volumen encerrado total según DNV Pt5 Ch7[71].

$$V_{\text{flotabilidad}} = 2487.66 \text{ m}^3$$

$$\frac{V_{\text{flotabilidad}}}{V_{\text{total}}} = 2.27 \quad (59)$$

Es superior al 1.5%, por lo tanto, cumplen con los requisitos de flotabilidad.

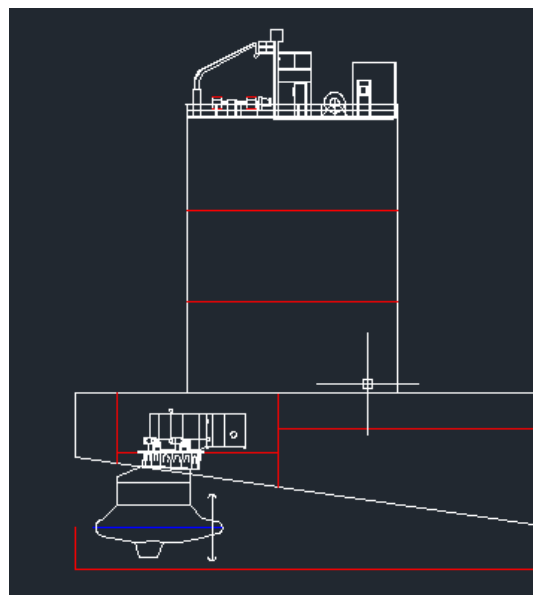


Figura 68, casings de popa, con aparejos de amarre y fondeo al tope.



### **5.3.7 Puente de mando.**

Situado en la parte superior de la 5ª cubierta y con una vista disponible de 360º, el puente de mando es lugar desde donde se dirigen todas las operaciones. En el mismo nivel consta de unas extensiones babor y estribor, para poder contralar también ambos costados durante las operaciones.

Se encuentran equipos como los de posicionamiento dinámico, equipos de radiocomunicaciones, control de la energía a bordo, elementos de navegación, alarmas de sectores...

### **5.3.8 Área de carga y trabajo.**

El área de carga y de trabajo se extiende desde popa del buque hasta los 153 m, dando lugar así a la cubierta de carga donde se colocan elementos necesarios para el transporte.

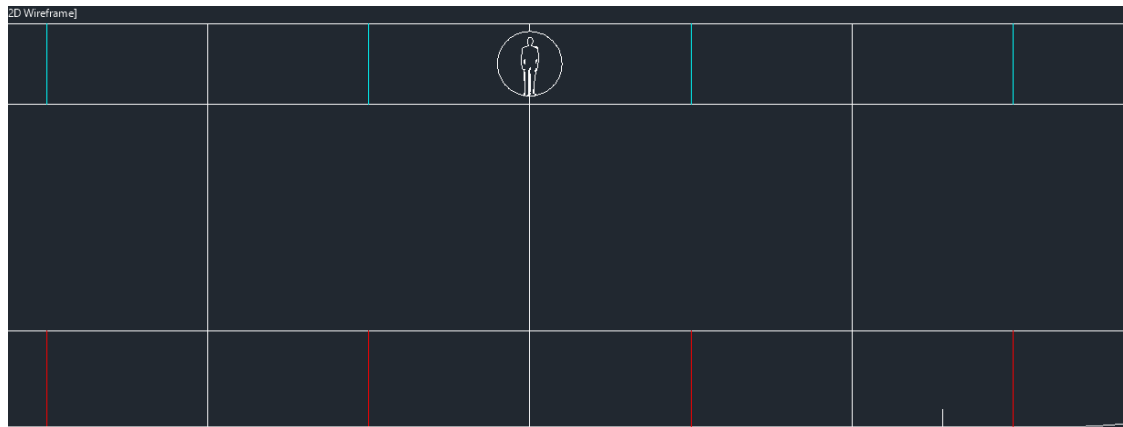
Algunos de los elementos son:

- Camas adecuadas al artefacto a transportar
- Elementos de estiba y trincaje
- Cabos y cadenas

### **5.3.9 Túnel de pasaje**

Según la normativa DNV Pt3 Ch3 Sc8 [70], sobre disposición general de los buques heavy Lift semisumergibles, estos estarán dotados de un túnel para el pasaje que comunique la proa con la popa. Este deberá encontrarse bajo la cubierta de carga siempre lo más cercano a la misma.

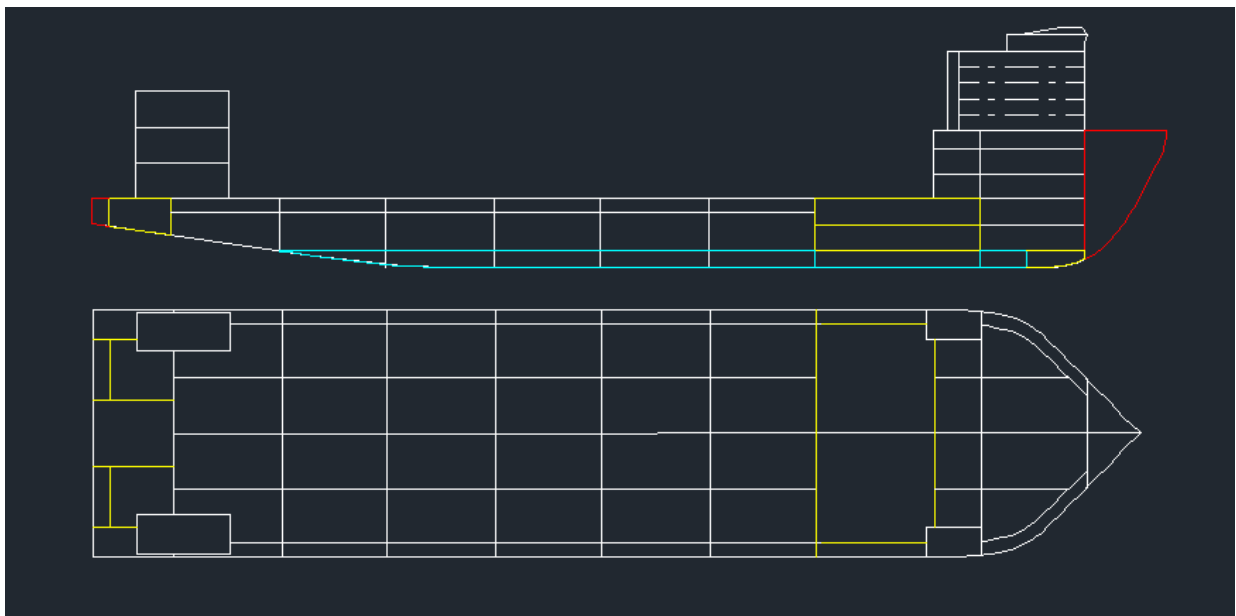
A continuación, se muestra un corte de sección con la disposición del túnel:



**Figura 69, túnel de pasaje justo debajo de la cubierta de carga que comunica proa y popa**

Se ha situado en la doble cubierta y en la crujía del buque. Consiste en un círculo de 2 metros de diámetro desde el que se puede acceder desde el nivel superior de la cámara de máquinas y comunica con los locales de los PODS a popa.

A continuación, se muestra la distribución final de los espacios a bordo.



**Figura 70, disposición general de los espacios**

## 5.4 Volúmenes de tanques

Es importante determinar el volumen de los principales tanques del buque y su disposición, intentado minimizar efectos nocivos como el de las superficies libres. También se tiene en cuenta la proximidad entre el tanque y el consumidor del contenido, evitando así longitud de tuberías desmesurada o uso de bombas excesivo.

### 5.4.1 Tanques de combustible

El volumen necesario de los tanques de combustible se calcula a un régimen de velocidad de 13 Kn y para cubrir una distancia de 15000 Mn, tal y como se ha especificado en los objetivos del proyecto. Para ello se utiliza la expresión dada en la asignatura de “Proyectos y artefactos navales” [22].

$$V = \frac{Ce * Pmp * Autonomia * Mp * Mg * Reg}{v * densidad} \quad (60)$$

Dónde:

Reg: Régimen de funcionamiento, se toma el 90%.

Ce: consumo específico MMPP de 0.185 g/Kwh MMAA de 0.190 Kg/Kwh

Mp y Mg: Márgenes por operaciones en puerto y margen global, de 10% y 5% respectivamente.

$$V_{pp} = \frac{0.185 * 11700 * 15000 * 1.1 * 1.05 * 0.9}{13 * 944} = 2894.90 \text{ m}^3$$

$$V_{pp} = \frac{0.190 * 1480 * 15000 * 1.1 * 1.05 * 0.9}{13 * 944} = 349.22 \text{ m}^3$$

Por último, se dimensionan los tanques de servicio diario. El SOLAS [1] especifica que su volumen debe ser suficiente para permitir el funcionamiento del buque al 100% de potencia durante 8 horas.

$$Vsd = (Pmp * Ce + Pmaux * Ce) * \left( \frac{1}{densidad} \right) * 8 h * Mg * Mp \quad (61)$$

$$Vsd = 25.19 m$$

Además, se le añade un margen por dilatación térmica del 95 %. La suma total de combustible requerida por los motores es:

$$Vtot = \frac{Vsd}{0.95} = 3268.41 m^3 \quad (62)$$

Se ha decidido dividir el combustible total requerido en 2 tanques de servicio diario y 4 de combustible principal.

Su situación en el buque es la siguiente:

Tanque	Capacidad(m3)	Xg(m)	Yg(m)	Zg(m)
<b>Fuel oil 1</b>	1380.28	121.91	5.12	6.4
<b>Fuel oil 2</b>	1380.28	121.91	-5.12	6.4
<b>Fuel oil 3</b>	238.10	146.76	17.75	10.05
<b>Fuel oil 4</b>	238.10	146.76	-17.75	10.05
<b>SD 1</b>	16.12	146.76	16.625	3.97
<b>SD 2</b>	16.12	146.76	-16.625	3.97

**Tabla 24, situación y capacidad de tanques de combustible**

El total de espacio de combustible disponible: 3269 m3

## 5.4.2 Tanques de servicios

### 5.4.2.1 Tanques de aceite para motores

El volumen de aceite necesario se estima en función de la potencia total instalada. Aplicando la misma expresión que en el anterior apartado.

$$V_{aceite} = \frac{Ce * P_{total} * autonomia * Mp * Mg}{v * densidad} \quad (63)$$

Dónde:

Densidad: 920 Kg/m<sup>3</sup>

Ce: 0.001 g/kwh

$$V_{aceite} = 18.087 \text{ m}^3$$

### 5.4.2.2. Tanques de lodos

Según el MARPOL [2], el volumen necesario de los tanques de lodos deberá ser de al menos un 1% del volumen total de combustible.

$$V_{lodos} = 0.01 * 3269 = 32.7 \text{ m}^3 \quad (64)$$

### 5.4.2.3. Tanques de aguas aceitosas

Son los encargados de recoger vertidos de aceite y de combustible de la CM. Se puede estimar su volumen gracias a la fórmula extraída de DNV Pt5 Ch10[58], que depende de un máximo número de días en navegación.

$$Aguas \text{ aceitosas} = Dias \text{ navegacion} * (0.2 + \left(7 * \left(\frac{P_{tot} - 10000}{10^6}\right)\right)) \quad (65)$$

Tomando la autonomía de 15000 millas náuticas, y una velocidad de 13 Kn, se puede calcular el tiempo que estaría en navegación para cubrir dicha distancia.

$$t = \frac{15000}{13 \cdot 24} = 48 \text{ días} \quad (66)$$

Se ha supuesto que el buque puede navegar hasta 60 días seguidos para sobredimensionar el resultado calculado.

$$V_{\text{aguas aceitosas}} = 13.33 \text{ m}^3$$

#### 5.4.2.4. Tanque de sentinas

Son tanques situados debajo de la CM que tiene como objetivo recolectar pérdidas de tuberías, juntas y bombas como consecuencia del funcionamiento normal de la planta propulsora. Según la IMO, *revised guidelines for systems for handling oily wastes in machinery spaces* [6], se puede estimar su volumen como función de la potencia instalada.

$$V_{\text{sentinas}} = 1.5 + \frac{P_{\text{tot}} - 1000}{1500} \quad (67)$$

$$V_{\text{sentinas}} = 10.12 \text{ m}^3$$

#### 5.4.2.5. Tanques de aguas residuales

Los tanques de aguas residuales se dimensionan de acuerdo con los consumos típicos estipulados en el “Proyecto básico del buque mercante” [26].

- 30 L/persona y día de aguas negras
- 60 L/persona y día de aguas grises.
- 60 L/persona y día de otros servicios

Se supone una estancia de máximo 15 días en puerto sin poder descargar aguas y contando con 25 personas a bordo.

$$V_{aguas} = 15 * 25 * C_e \quad (68)$$

$$Aguas\ grises = 30\ m^3$$

$$Aguas\ negras = 11.25\ m^3$$

#### 5.4.2.6. Tanques de derrames y sedimentación

Ambos se calculan en función de la potencia de los motores principales y un tiempo de funcionamiento propuesto por la normativa DNV Pt 5[58].

$$V = (P_{pp} * C_e + P_{aux} * C_e) * \frac{1}{densidad} * horas * margen \quad (69)$$

Dónde:

- Derrames se toma un tiempo de 5h
- Sedimentación se toma un tiempo de 24 h

$$V_{derrames} = 14.96\ m^3$$

$$V_{sed} = 71.81\ m^3$$

Tanque	Capacidad(m3)	Xg(m)	Yg(m)	Zg(m)
Aceite	10.12x2	149	17.12/-17.12	10.052
Lodos	46.73	147.34	2	1.5
Aceite sucio	23.37	147.36	-2	1.5
Aguas aceitosas	17.54	145.85	2	1.5
Sentinas	17.54	149.36	-2	1.5
Derrames	23.35	149.36	-2	1.5

<b>sedimentación</b>	52.23x2	145.85	5.65/-5.65	1.5
<b>Aguas negras</b>	11.62	139.1	-19.75	8.37
<b>Aguas grises</b>	32.55	139.1	19	8.62

**Tabla 25, situación de tanques de desperdicios**

#### 5.4.2.7. Tanques de agua dulce

En el libro “Proyecto básico del buque mercante” [26] se hace una estimación del consumo de agua dulce por persona y día. Para obtener tal valor, no solo se tiene en cuenta el consumo de relativo a la alimentación, sino también el de refrigeración, sanidad, lavandería, cocina...

Dicho volumen se estima en 200 m3 de agua por persona y día.

Según la normativa ISO se obtiene la siguiente tabla de consumos a bordo:

<b>Punto de servicio</b>	<b>Consumo (l)</b>	<b>Frecuencia de uso(día)</b>	<b>Consumo de agua fría(l/día)</b>	<b>Consumo de agua caliente (l/día)</b>	<b>Cantidad total (l/día)</b>
<b>Lavabo de pared</b>	2	6	5	7	12
<b>Plato de ducha</b>	60	2	50	70	120
<b>Retrete de vacío</b>	1.2	6	8	-	8
<b>Cocina</b>	-	-	8	12	20
<b>Lavandería</b>	-	-	15	23	38
<b>Limpieza</b>	-	-	2	3	5

**Tabla 26, consumos de agua dulce**

Que aproximadamente da 203 L por persona/día.

Se tomará 60 días como referencia del tiempo máximo continuado de navegación, y se podrá estimar el volumen requerido de agua dulce.



$$Vagua\ dulce = Ce * personas * días \quad (70)$$

$$Vagua\ dulce = 300m^3$$

Se dividirá el volumen en dos tanques, que se colocarán simétricamente respecto crujía en las siguientes coordenadas.

Tanque	Capacidad(m3)	Xg(m)	Yg(m)	Zg(m)
Agua dulce Er	159.17	157.34	12.5	10
Agua dulce Br	159.17	157.34	-12.5	10

**Tabla 27, disposición de los tanques de agua dulce**

### 5.4.3 Tanques de lastre

El resto de volumen disponible, sin tener en cuenta el de la sala de máquinas y los locales de propulsión, será utilizado para agua de lastre.

El volumen total restante se obtiene de restar al volumen total los espacios no usados para el lastre.

$$V_{tot} = 109286.27\ m^3$$

El volumen de la sala de máquinas se divide en 3 cálculos, ya que la manga varia a lo largo de la misma.

$$V_{CM1} = 21.64 * 9.51 * 40 = 8231.85\ m^3 \quad (71)$$

$$V_{CM2} = 8.36 * 34 * 4.75 = 1350.14\ m^3 \quad (72)$$

$$V_{CM3} = 8.36 * 40 * 4.75 = 1588.4\ m^3 \quad (73)$$

$$V_{total\ CM} = \sum V_{CMi} = 11170.39\ m^3 \quad (74)$$

El volumen del local de los PODS se calcula gracias al software *Maxsurf stability* [62].

$$V_{pods} = 730.96 * 2 = 1463.92 \text{ m}^3 \quad (75)$$

Para las hélices de proa se sigue el mismo procedimiento.

$$Volumen Local hélices de proa = 1944.3 \text{ m}^3 \quad (76)$$

El resto de los volúmenes que no son de lastre, perteneciente al combustible, túnel de pasaje y volúmenes de residuos.

$$V_{restante} = 3290.36 \text{ m}^3 \quad (77)$$

Por lo tanto, el volumen de agua de lastre disponible, teniendo en cuenta el que queda dentro de la sala de máquinas:

$$V_{lastreCM} = 1403.44 \text{ m}^3 \quad (78)$$

$$V_{lastre} = V_{lastreCM} + V_{restante} = 92820.74 \text{ m}^3 \quad (79)$$

Los tanques de lastre distribuidos a lo largo de la eslora del buque son los que siguen:

Tanque	Xo(m)	Xf(m)	Yo(m)	Yf(m)	Zo(m)	Zf(m)
Casing popa Er 1	7.95	25	14.8	21.98	19	12.51
Casing popa Br 1	7.95	25	-21.98	-14.8	19	12.51
Casing popa Er 2	7.95	25	14.8	21.98	25.5	19
Casing popa Br 2	7.95	25	-21.98	-14.8	25.5	19
Casing popa Er 3	7.95	25	14.8	21.98	32.02	25.5
Casing popa Br 3	7.95	25	-21.98	-14.8	32.02	25.5
Espejo Er	0.001	3	6	17	12.51	5
Espejo Br	0.001	3	-17	-6	12.51	5
Popa	0.001	13.1	-6	6	12.51	5
Popa Er	0.001	14.5	17	22.44	12.51	5
Popa Br	0.001	14.5	-22.44	-17	12.51	5
Lastre 1 Er	14.5	34.3	10	20	10.01	3
Lastre 1 Er	14.5	34.3	0	10	10.01	3
Lastre 1 Br	14.5	34.3	-10	0	10.01	3
Lastre 1 Br	14.5	34.3	-20	-10	10.01	3
Lastre 1 cubierta Er +	14.5	34.3	10	20	12.51	10.01
Lastre 1 cubierta Er	14.5	34.3	0	10	12.51	10.01
Lastre 1 cubierta Br	14.5	34.3	-10	0	12.51	10.01
Lastre 1 cubierta Br +	14.5	34.3	-20	-10	12.51	10.01
Lastre 2 DF Er +	34.3	53.5	10	22.44	3	0
Lastre 2 DF Er	34.3	53.5	0	10	3	0
Lastre 2 DF Br	34.3	53.5	-10	0	3	0
Lastre 2 DF Br +	34.3	53.5	-22.44	-10	3	0
Lastre 2 Er +	34.3	53.5	10	20	10.01	3
Lastre 2 Er	34.3	53.5	0	10	10.01	3

<b>Lastre 2 Br</b>	34.3	53.5	-10	0	10.01	3
<b>Lastre 2 Br +</b>	34.3	53.5	-20	-10	10.01	3
<b>Lastre 2 cubierta Er +</b>	34.3	53.5	10	20	12.51	10.01
<b>Lastre 2 cubierta Er</b>	34.3	53.5	0	10	12.51	10.01
<b>lastre 2 cubierta Br</b>	34.3	53.5	-10	0	12.51	10.01
<b>Lastre 2 cubierta Br +</b>	34.3	53.5	-20	-10	12.51	10.01
<b>Lastre 3 DF Er +</b>	53.5	73.3	10	22.44	3	0
<b>Lastre 3 Df Er</b>	53.5	73.3	0	10	3	0
<b>Lastre 3 DF Br</b>	53.5	73.3	-10	0	3	0
<b>Lastre 3 DF Br +</b>	53.5	73.3	-22.44	-10	3	0
<b>Lastre 3 Er +</b>	53.5	73.3	10	20	10.01	3
<b>Lastre 3 Er</b>	53.5	73.3	0	10	10.01	3
<b>Lastre 3 Br</b>	53.5	73.3	-10	0	10.01	3
<b>Lastre 3 Br +</b>	53.5	73.3	-20	-10	10.01	3
<b>Lastre 3 cubierta Er+</b>	53.5	73.3	10	20	12.51	10.01
<b>Lastre 3 cubierta Er</b>	53.5	73.3	0	10	12.51	10.01
<b>Lastre 3 cubierta Br</b>	53.5	73.3	-10	0	12.51	10.01
<b>Lastre 3 cubierta Br+</b>	53.5	73.3	-20	-10	12.51	10.01
<b>Lastre 4 Df Er +</b>	73.3	92.51	10	22.44	3	0
<b>Lastre 4 Df Er</b>	73.3	92.51	0	10	3	0
<b>Lastre 4 DF Br</b>	73.3	92.51	-10	0	3	0
<b>Lastre 4 DF Br+</b>	73.3	92.51	-22.44	-10	3	0
<b>Lastre 4 Er +</b>	73.3	92.51	10	20	10.01	3
<b>Lastre 4 Er</b>	73.3	92.51	0	10	10.01	3
<b>Lastre 4 Br</b>	73.3	92.51	-10	0	10.01	3
<b>Lastre 4 Br +</b>	73.3	92.51	-20	-10	10.01	3
<b>Lastre 4 cubierta Er +</b>	73.3	92.51	10	20	12.51	10.01
<b>Lastre 4 cubierta Er</b>	73.3	92.51	0	10	12.51	10.01

<b>Lastre 4 cubierta Br</b>	73.3	92.51	-10	0	12.51	10.01
<b>Lastre 4 cubierta Br+</b>	73.3	92.51	-20	-10	12.51	10.01
<b>Lastre 5 DF Er+</b>	92.51	112.31	10	22.44	3	0
<b>Lastre 5 DF Er</b>	92.51	112.31	0	10	3	0
<b>Lastre 5 DF Br</b>	92.51	112.31	-10	0	3	0
<b>Lastre 5 DF Br +</b>	92.51	112.31	-22.44	-10	3	0
<b>Lastre 5 Er +</b>	92.51	112.31	10	20	10.01	3
<b>Lastre 5 Er</b>	92.51	112.31	0	10	10.01	3
<b>Lastre 5 Br</b>	92.51	112.31	-10	0	10.01	3
<b>Lastre 5 Br +</b>	92.51	112.31	-20	-10	10.01	3
<b>Lastre 5 cubierta Er +</b>	92.51	112.31	10	20	12.51	10.01
<b>Lastre 5 cubierta Er</b>	92.51	112.31	0	10	12.51	10.01
<b>lastre 5 cubierta Br</b>	92.51	112.31	-10	0	12.51	10.01
<b>Lastre 5 cubierta Br +</b>	92.51	112.31	-20	-10	12.51	10.01
<b>Lastre 6 Df Er +</b>	112.31	131.52	10	22.44	3	0
<b>Lastre 6 DF Er</b>	112.31	131.52	0	10	3	0
<b>Lastre 6 DF Br</b>	112.31	131.52	-10	0	3	0
<b>Lastre 6 DF Br +</b>	112.31	131.52	-22.44	-10	3	0
<b>Lastre 6 Er +</b>	112.31	131.52	10	20	10.01	3
<b>Lastre 6 Br +</b>	112.31	131.52	-20	-10	10.01	3
<b>Lastre 6 Cubiert Er +</b>	112.31	131.52	10	20	12.51	10.01
<b>Lastre 6 cubierta Er</b>	112.31	131.52	0	10	12.51	10.01
<b>Lastre 6 cubierta Br</b>	112.31	131.52	-10	0	12.51	10.01
<b>Lastre 6 cubierta Br+</b>	112.31	131.52	-20	-10	12.51	10.01
<b>Lastre 9 Er +</b>	161.52	180.72	10	18	17	12.51
<b>Lastre 9 Er</b>	161.52	180.72	0	10	17	12.51
<b>Lastre 9 Br</b>	161.52	180.72	-10	0	17	12.51
<b>Lastre 9 Br +</b>	161.52	180.72	-18	-10	17	12.51

<b>Doble Costado 9 Br</b>	161.52	180.72	-22.44	-18	17	12.51
<b>Doble costado 9 Er</b>	161.52	180.72	18	22.44	17	12.51
<b>Lastre 10 Er +</b>	161.52	180.72	10	18	21.5	17
<b>Lastre 10 Er</b>	161.52	180.72	0	10	21.5	17
<b>Lastre 10 Br</b>	161.52	180.72	-10	0	21.5	17
<b>Lastre 10 Br +</b>	161.52	180.72	-18	-10	21.5	17
<b>Doble costado 10 Er</b>	161.52	180.72	18	22.44	21.5	17
<b>Doble costado 10 Br</b>	161.52	180.72	-22.44	-18	21.5	17
<b>Lastre 11 Er +</b>	161.52	180.72	10	18	25	21.5
<b>Lastre 11 Er</b>	161.52	180.72	0	10	25	21.5
<b>Lastre 11 Br</b>	161.52	180.72	-10	0	25	21.5
<b>Lastre 11 Br +</b>	161.52	180.72	-18	-10	25	21.5
<b>Doble costado 11 Er</b>	161.52	180.72	-22.44	-18	25	21.5
<b>Doble costado 11 Br</b>	161.52	180.72	18	22.44	25	21.5
<b>Doble Costado 8 Er</b>	161.52	180.72	18	22	12.51	3
<b>Lastre 8 Er +</b>	161.52	180.72	10	18	12.51	7.75
<b>Lastre 8 Er</b>	161.52	180.72	0	10	12.51	7.75
<b>Lastre 8 Br</b>	161.52	180.72	-10	0	12.51	7.75
<b>Lastre 8 Br +</b>	161.52	180.72	-18	-10	12.51	7.75
<b>Doble costado 8 Br</b>	161.52	180.72	-22.44	-18	12.51	3
<b>Lastre 7 Df Er +</b>	170	180.72	10	22.44	3	0
<b>Lastre 7 DF Er</b>	170	180.72	0	10	3	0
<b>lastre 7 DF Br</b>	170	180.72	-10	0	3	0
<b>Lastre 7 DF Br+</b>	170	180.72	-22.44	-10	3	0
<b>Lastre 7</b>	170	180.72	-10	10	7.75	3
<b>DF CM Er</b>	131.52	153.16	10	22.44	3	0
<b>DF CM 3 Br +</b>	153.16	161.52	-22.44	-10	3	0
<b>DF CM 1 Er</b>	137.02	153.16	0	10	3	0

<b>DF CM 1 Br</b>	137.02	153.16	-10	0	3	0
<b>DF CM 2 Er</b>	131.52	137.02	7.25	10	3	0
<b>DF CM 2 Br</b>	131.52	137.02	-10	-7.25	3	0
<b>DF CM Br</b>	131.52	153.16	-22.44	-10	3	0
<b>DF CM 3 Er +</b>	153.16	161.52	10	22.44	3	0
<b>DF CM 3 Er</b>	153.16	161.52	0	10	3	0
<b>DF CM 3 Br</b>	153.16	161.52	-10	0	3	0
<b>Costado CM Er 1</b>	131.52	153.16	20	22.44	7.75	3
<b>Costado CM Br 1</b>	131.52	153.16	-22.44	-20	7.75	3
<b>Costado CM Er 2</b>	131.52	153.16	20	22.44	12.51	7.75
<b>Costado CM Br 2</b>	131.52	153.16	-22.44	-20	12.51	7.75
<b>Costado CM Er 1'</b>	153.16	161.52	-22.44	-17	7.75	3
<b>Costado CM Br 1'</b>	153.16	161.52	17	22.44	7.75	3
<b>Costado CM Er 2'</b>	153.16	161.52	-22.44	-20	12.51	7.75
<b>Costado CM Br 2'</b>	153.16	161.52	20	22.44	12.51	7.75
<b>Lastre CM Es inferior</b>	150.48	161.52	-17	-10.44	7.75	3
<b>Lastre CM Br Inferior</b>	150.48	161.52	10.44	17	7.75	3
<b>Lastre CM Er superior</b>	147.84	161.52	-20	-14.5	12.51	7.75
<b>Lastre CM Br superior</b>	147.84	161.52	14.5	20	12.51	7.75
<b>Castillo 1 Er +</b>	153	161.52	10	20	17	12.51
<b>Castillo 1 Er</b>	153	161.52	0	10	17	12.51
<b>Castillo 1 Br</b>	153	161.52	-10	0	17	12.51
<b>Castillo 1 Br +</b>	153	161.52	-20	-10	17	12.51
<b>Castillo 2 Er +</b>	153	161.52	10	20	21.5	17
<b>Castillo 2 Er</b>	153	161.52	0	10	21.5	17
<b>Castillo 2 Br</b>	153	161.52	-10	0	21.5	17
<b>Castillo 2 Br +</b>	153	161.52	-20	-10	21.5	17
<b>Castillo 3 Er +</b>	153	161.52	10	20	25	21.5

<b>Castillo 3 Er</b>	153	161.52	0	10	25	21.5
<b>Castillo 3 Br</b>	153	161.52	-10	0	25	21.5
<b>Castillo 3 Br +</b>	153	161.52	-20	-10	25	21.5
<b>Castillo Costado Er</b>	153	161.52	20	22.44	25	12.51
<b>Castillo Costado Br</b>	153	161.52	-22.44	-20	25	12.51
<b>Pique proa 1 Er</b>	180.72	194	0	22.44	12.51	0
<b>Pique proa 1 Br</b>	180.72	194	-22.44	0	12.51	0
<b>Pique proa 2 Er</b>	180.72	195.614	0	22.44	17	12.51
<b>Pique proa 2 Br</b>	180.72	195.614	-22.44	0	17	12.51
<b>Pique proa 3 Er</b>	180.72	195.614	0	22.44	21.5	17
<b>Pique proa 3 Br</b>	180.72	195.614	-22.44	0	21.5	17
<b>Pique proa 4 Er</b>	180.72	195.614	0	22.44	25	21.5
<b>Pique proa 4 Br</b>	180.72	195.614	-22.44	0	25	21.5
<b>Costado 1 Er</b>	14.5	34.3	20	22.44	10	3
<b>Costado 2 Er</b>	34.3	53.5	20	22.44	10	3
<b>Costado 3 Er</b>	53.5	73.3	20	22.44	10	3
<b>Costado 4 Er</b>	73.3	92.51	20	22.44	10	3
<b>Costado 5 Er</b>	92.51	112.31	20	22.44	10	3
<b>Costado 6 Er</b>	112.31	131.52	20	22.44	10	3
<b>Costado 1 Br</b>	14.5	34.3	-22.44	-20	10	3
<b>Costado 2 Br</b>	34.3	53.5	-22.44	-20	10	3
<b>Costado 3 Br</b>	53.5	73.3	-22.44	-20	10	3
<b>Costado 4 Br</b>	73.3	92.51	-22.44	-20	10	3
<b>Costado 5 Br</b>	92.51	112.31	-22.44	-20	10	3
<b>Costado 6 Br</b>	112.31	131.52	-22.44	-20	10	3
<b>Costado cubierta 1 Er</b>	14.5	34.3	20	22.44	12.51	10
<b>Costado cubierta 2 Er</b>	34.3	53.5	20	22.44	12.51	10
<b>Costado cubierta 3 Er</b>	53.5	73.3	20	22.44	12.51	10



<b>Costado cubierta 4 Er</b>	73.3	92.51	20	22.44	12.51	10
<b>Costado cubierta 5 Er</b>	92.51	112.31	20	22.44	12.51	10
<b>Costado cubierta 6 Er</b>	112.31	131.52	20	22.44	12.51	10
<b>Costado cubierta 1 Br</b>	14.5	34.3	-22.44	-20	12.51	10
<b>Costado cubierta 2 Br</b>	34.3	53.5	-22.44	-20	12.51	10
<b>Costado cubierta 3 Br</b>	53.5	73.3	-22.44	-20	12.51	10
<b>Costado cubierta 4 Br</b>	73.3	92.51	-22.44	-20	12.51	10
<b>Costado cubierta 5 Br</b>	92.51	112.31	-22.44	-20	12.51	10
<b>Costado cubierta 6 Br</b>	112.31	131.52	-22.44	-20	12.51	10

**Tabla 28, disposición final de tanques de lastre**

## Capítulo 6. Estimación de los pesos

Para poder realizar los análisis con mayor grado de fiabilidad se calculará el reparto de pesos a lo largo de la eslora y la manga del buque.

El peso en rosca del buque se estimó en el dimensionamiento básico, y los valores que se derivan de estos primeros cálculos se han añadido al software para poder estimar la estabilidad.

$$\text{Peso en rosca} = 20450.77 \text{ t}$$

$$\text{Peso de acero} = 15308.7 \text{ t}$$

Hay que tener en cuenta que el peso del acero incluye todo el acero del buque, de modo que, para poder estimar el peso del acero continuo se debe antes restar los *casings* de popa, el castillo de proa y la superestructura.

### 6.1. Acero continuo

El peso de los *casings* de popa se hará de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\text{Peso} = C_p * \text{Volumen} \quad (81)$$

Dónde:

$C_p$ : se ha tomado un factor de 0.14 t/m<sup>3</sup>, obtenido del “Proyecto básico del buque mercante” [26].

Los volúmenes necesarios para el cálculo se pueden obtener del mismo programa.

$$V_{\text{casings}} = 4770.06 \text{ m}^3 \quad (82)$$

$$V_{\text{castillo}} = 18436.15 \text{ m}^3 \quad (83)$$

Obteniendo los siguientes pesos:

$$P_{casings} = 667.80 \text{ t}$$

$$P_{castillo} = 2581.06 \text{ t}$$

A continuación, se calcula el peso estimado de la superestructura (solo del acero) para lo que se cuenta con otros coeficientes:

<b>Cubierta inferior</b>	0.065	t/m3
<b>Cuberitas intermedia</b>	0.055	t/m3
<b>Puente de mando</b>	0.04	t/m3

**Tabla 29, pesos de las distintas cubiertas**

Las dimensiones de la superestructura se estimaron en el capítulo de disposición general, de la que se obtienen los volúmenes necesarios.

$$V_{cubierta\ 1} = 2282.85 \text{ m}^3 \quad (84)$$

$$V_{cubiertas\ 2,3,4} = 9120 \text{ m}^3 \quad (85)$$

$$V_{puente} = 940.5 \text{ m}^3 \quad (86)$$

$$Peso\ superestructura = 687.60 \text{ t} \quad (87)$$

Elemento	Xg(m)	Yg(m)	Zg(m)
Casings	16.5	18/-18	22
Castillo	172	0	15
Superestructura	167	0	30

Tabla 30, posición del CG de las estructuras

Con los valores obtenidos, se puede despejar el peso de la estructura longitudinal de acero continuo, y posteriormente colocar los datos en el software.

$$\text{Acero continuo} = 11372.22 \text{ t}$$

Para dividir el peso del acero continuo, el buque se ha dividido en 20 secciones equidistantes a lo largo de toda la eslora, y mediante un software CAD, se ha medido el perímetro de sección en cada uno de los cortes.

Seguidamente, se ha obtenido una relación entre cada perímetro medido y el máximo de ellos, obteniendo una relación unitaria. El sumatorio de la relación unitaria de las 20 secciones se considera entonces como el peso total del buque, y nos permite obtener una relación entre el peso real y el aparente.

Con la relación unitaria y la relación de peso real-aparente ya se puede hallar el peso real de cada sección.

Secciones	x(m)	Perímetro(m)	Relación unitaria	Peso real(t)
0	0	97.63	0.862836942	537.809643
1	9.76	100.56	0.888731772	553.949992
2	19.52	103.47	0.914449845	569.980167
3	29.28	106.32	0.939637649	585.679824
4	39.04	109.17	0.964825453	601.379481
5	48.8	111.45	0.984975696	613.939206
6	58.56	113.15	1	623.303914
7	68.32	113.15	1	623.303914

<b>8</b>	78.08	113.15	1	623.303914
<b>9</b>	87.84	113.15	1	623.303914
<b>10</b>	97.6	113.15	1	623.303914
<b>11</b>	107.36	113.15	1	623.303914
<b>12</b>	117.12	113.15	1	623.303914
<b>13</b>	126.88	113.15	1	623.303914
<b>14</b>	136.64	113.15	1	623.303914
<b>15</b>	146.4	113.15	1	623.303914
<b>16</b>	156.16	109.52	0.967918692	603.307509
<b>17</b>	165.92	96.98	0.857092355	534.229019
<b>18</b>	175.68	69.74	0.616349978	384.173353
<b>19</b>	185.44	28.09	0.248254529	154.73802
<b>20</b>	195.2	0	0	0

**Tabla 31, distribución del peso del acero continuo**

## 6.2 Peso de los PODS de popa

El peso de otros equipos se conoce gracias a la información proporcionado por la empresa de la que se ha seleccionado el elemento.

En el caso de los PODS XO 1600 no se ha encontrado el peso del conjunto, pero se ha podido estimar gracias a la información dada sobre versiones más potentes del mismo.

Como se ha definido en el capítulo de elección de cálculo de la potencia y elección de propulsor/motor, los PODS dividen su peso en distintos elementos.

### 6.2.1 Peso de la hélice

Se hace un cálculo sencillo a partir de los datos obtenidos del Xo 2100 [47].

Diámetro(m)	Peso(t)	Peso/m(t/M)
4.4	22	4
6.4	30	4

Tabla 32, peso para los distintos diámetros

Como la hélice escogida en el proyecto mide 4.7 m, el cálculo es sencillo.

$$Phélice = 22 + (4 * 0.3) = 23.2 \text{ t} \quad (88)$$

### 6.2.2 Peso del motor

Se ha hecho mediante la relación del volumen inscrito en el paralelepípedo que forma el objeto de cálculo.

El peso del módulo Xo2100, se encuentra entre 135-155 toneladas, que a su vez depende de una distancia “E”. Sabiendo dicha distancia que se ha seleccionado para el buque proyecto, se puede determinar la distancia aproximada “E” del módulo Xo2100.

	Xo1600	Xo2100	
Volumen	174.13	363.87	m3
Emin/Emax	3.3/4.7	4.3/7.1	m
E	4.3	6.3	m
Peso/m		7.14	t/m
Peso	71.45 t	149.28	t

Tabla 33, datos de volumen y peso de los PODS XO

El resto de peso de los quipos que conforman el sistema propulsivo del buque se ha estimado del mismo modo.

Los elementos de control que se encuentran en la sala de popa de los PODS no varían de un modelo a otro.

Elemento	Peso(t)
Hélice	23.2
Motor	71.45
Elementos control	3.1
Módulo de giro	35.049
Elementos de aire	8.69
TOTAL	<b>141.44</b>

**Tabla 34, peso total del propulsor**

### 6.3 Pesos complementarios

También se puede estimar el peso de la tripulación. El peso por persona se estima en 125 Kg, según “El proyecto básico del buque mercante” [26].

Peso tripulación= 3.12 toneladas

El peso de las bombas de lastre también puede ser calculado. Se tomará un tiempo de referencia de llenado/vaciado del buque de 12h, y sabiendo el volumen de los tanques de lastre anteriormente calculado, se podrá estimar el caudal necesario.

$$Caudal = \frac{Volumen\ lastre}{12\ h} = 7778.27\ m^3/h \quad (89)$$

Para poder cumplir con estos requisitos de trasvase de agua de lastre se han seleccionado bombas AZCUE. X2 LD de hasta 4000 m<sup>3</sup>/h.

X2 CM de hasta 2000m<sup>3</sup>/h.



Figura 71, bombas Azcue de lastre seleccionadas

Equipo	Peso(t)	Xg(m)	Yg(m)	Zg(m)
MMpp	50	138.17	12.94	4.3
MMpp	50	138.17	4.4	4.3
MMpp	50	138.17	-12.94	4.3
MMpp	50	138.17	-4.4	4.3
Maux	14	147.72	8.68	4
Maux	14	147.72	8.68	4
Hélice de proa	12.25	172	0	1.5
Hélice de proa	12.25	175	0	1.5
PODS Er	141.44	7.25	11.5	8.75
PODS Br	141.44	7.25	-11.5	8.75
Bomba Lastre 1	0.82	136.62	8.68	3
Bomba Lastre 2	0.475	140	8.68	3
Bomba Lastre 3	0.475	140	-8.68	3
Bomba Lastre 4	0.82	136.62	-8.68	3
Tripulación	3.12	162	0	35

Tabla 35, situación de los pesos puntuales



## 6.4 Reparto de pesos restantes

En este punto todavía queda mucho peso por repartir y muchos elementos por dimensionar como: Pintura, protección catódica, botellas de aire, sistemas de contraincendios, elementos de fondeo y amarre, bombas de todo tipo, equipos de navegación, purificadoras, calentadores, convertidores, cuadros de control, talleres, habilitación...

Atendiendo al excesivo nivel de detalle que comporta el cálculo de dichos elementos, se opta por hacer una distribución coherente con el peso restante.

De modo que, a repartir se obtiene un total de 4604.95 t, de las cuales 767.9 t son de elementos de maquinaria y 3837 t corresponden a equipos y habilitación.

El peso de la maquinaria se ha colocado en el centro de gravedad de la sala de máquinas.

El peso de los quipos y habilitación se ha dividido, de manera aproximada de la siguiente manera:

- 15% a lo largo de la cubierta de carga.
- 25% a popa.
- 65 % a proa.

<b>Peso CM Repartido(t)</b>	767.900	146.520	0.000	7.750
<b>Peso equipos proa(t)</b>	2494.000	174.000	0.000	25.000
<b>Peso equipos popa(t)</b>	959.300	12.500	0.000	12.510
<b>Peso equipos cubierta(t)</b>	575.550	76.500	0.000	12.510

**Tabla 36, resto de pesos repartidos**

## Capítulo 7. Estabilidad

En el presente capítulo se pretende realizar un estudio sobre la estabilidad del buque en distintas situaciones que se puedan dar durante la vida operativa del mismo. Para ello se han propuesto y analizado distintas situaciones de carga reales a las que el buque pueda operar, introduciéndolas en el software *Maxsurf Stability* [62], que nos permite realizar los análisis pertinentes.

Los requisitos mínimos de estabilidad requeridos están definidos por la IMO [6] y la normativa DNV GL Pt5 Ch10 [58].

Para poder realizar los cálculos se dispone de todos los cálculos hechos anteriormente, y, además, se harán estimaciones de otros pesos relevantes repartidos a lo largo de la eslora del buque como son:

- Peso del acero continuo
- Peso de equipos no contabilizado
- Peso superestructura
- Peso castillo de proa
- Peso de los *casings* y sus grúas

Cuando se tenga el máximo número de pesos determinado y distribuido se realizará un análisis de la estabilidad en diferentes condiciones de carga y lastre.

Con los resultados obtenidos se podrá calcular, en posteriores capítulos, la estructura del buque y determinar así su resistencia longitudinal.

## 7.1 Cargas típicas de transporte

En el capítulo 1 ya se ha hecho una explicación de transportes famosos de este tipo de buques y del tipo de cargas que pueden llegar a transportar.

Una de las características más excepcionales es la exclusividad de cada uno de los transportes que los buques heavy Lift semisumergibles realizan. Cada uno de los procesos de carga, transporte y descarga de cualquier artefacto está cuidadosamente estudiado.

En cada trabajo realizado, la carga varía en peso y dimensiones principales. Por dicha razón, no hay una sola carga con unas características fijas con la que se pueda estudiar la estabilidad.

Se debe tener en cuenta que las cargas suelen tener una longitud inferior a la cubierta de carga del buque, de modo que se situará la carga allí donde el centro de gravedad total del conjunto buque-carga se vea menos afectado. Además, transversalmente se considerará que el centro de gravedad estará en la línea de crujía.

El máximo peso que podrá llevar el buque se calcula gracias al DWT menos los consumibles a bordo.

$$Carga\ max = 40000 - W_{consumos} \quad (80)$$

Los pesos de los consumibles son los de combustible, aceite, agua dulce, desechos y tripulación. Todos ellos ya han sido determinados en anteriores apartados.

Combustible: 3086.92 t

Aceite: 18.62 t

Tripulación: 3.125 t

Agua: 318.34 t

Desechos: 241.88 t

$$Carga\ max = 40000 - 3669 = 36331\ t$$

Es importante resaltar que el peso obtenido se dividirá en carga útil y en lastre necesario para equilibrar el buque y conseguir una estabilidad adecuada. Debido a los centros de gravedad elevados de la carga, el peso total admisible a transportar debería ser menor.

### 7.1.1 Transporte de un módulo de grúas

Es una carga que presenta un centro de gravedad muy elevado, al límite de lo que este tipo de buques suele transportar, pero presenta un peso muy inferior al máximo admisible.

El proceso de carga se hace mediante raíles (SKID ON) desde puerto a través de la popa del buque.

La empresa OHT [15] tiene un registro de los transportes de módulo de grúas realizados:

Nombre	Peso(MT)	Longitud(m)	Anchura(m)	Altura(m)
Liebherr cranes	3298	90	41	75
ZPMC STS cranes	8500	140	35	81
ZPMC RTG cranes	4000	155	33	68

Las características que presenta el módulo de grúas escogido es la siguiente:

<b>Peso</b>	8500	T
<b>Longitud</b>	140	M
<b>Altura</b>	81	M
<b>Ancho</b>	35	M
<b>XG</b>	75	M
<b>ZG</b>	53	M

Tabla 37, datos del módulo de grúas



Figura 72, transporte de un módulo de grúas

### 7.1.2 Transporte de una plataforma semisumergible

Este tipo de estructuras son las más comunes dentro de los transportes que realizan este tipo de buques. Se embarcan en cubierta mediante el método de FLOAT ON, y tienen dimensiones muy variables.

Por lo general su centro de gravedad es de moderado a bajo (en comparación con otros tipos de cargas y suelen sobresalir por la manga del buque varios metros.

De empresas como OHT[15], y Sevan Drilling [73], se ha podido obtener los datos de algunas plataformas.

Nombre	Peso(Mt)	Longitud(m)	Anchura(m)	Altura(m)
Sevan pirenema	55000	60		28
Sevan Brasil	55000	86	75	25
Arendal spirit	50000	75		11
Voyageur Spirit	45000	60	60	20
Western isles fpso	5000			24
Goliat	210000	90	90	35

Se ha buscado características de alguna plataforma que ponga al límite la estabilidad del buque proyecto. Para ello se ha escogido parámetros dentro de las características de la tabla presentada que concuerden con las dimensiones y capacidades del buque proyecto.

<b>Peso</b>	30000	T
<b>Longitud</b>	55	M
<b>Altura</b>	29	M
<b>Ancho</b>	50	M
<b>XG</b>	85	M
<b>ZG</b>	27	M

**Tabla 38, datos de una FPSO**



**Figura 73, transporte de una FPSO**

## **7.2 Condiciones de carga**

El análisis de estabilidad se llevará a cabo con las dos cargas anteriores y en lastre. Se aplicarán dos condiciones, salida de puerto y llegada a puerto. La salida de puerto se considera un 100% de consumibles y 10% de desechos, mientras que a la llegada se toma 10% de consumibles y 80% de desechos.

### **Calado mínimo**

El calado mínimo del buque se ha estimado en 8 metros desde la línea base. Se realizará el análisis en los dos casos comentados anteriormente, en salida de puerto y llegada.

### **Salida de puerto con lastre**

En esta condición de carga el buque navega lastrado para mantener el centro de gravedad lo más bajo posible y así mantener una buena estabilidad. Los consumibles estarán al 100% y los desechos al 10%.

### **Llegada a puerto con lastre**

Al igual que la anterior condición de carga, se busca lastrar el buque hasta el mínimo calado. Los consumibles estarán al 10% y los desechos al 80%.

### **Salida de puerto con módulo de grúas**

Esta condición de carga pondrá a prueba la estabilidad del buque debido al alto Cg de la carga, que provoca que un menor peso pueda dificultar el transporte. Para ello se lastrarán los tanques inferiores con la finalidad de disminuir la altura total del conjunto buque-carga.

### **Llegada a puerto con módulo de grúas**

La condición de carga presenta las mismas dificultades que la anterior. En esta ocasión los consumibles estarán al 10% y los desechos al 80%.

### **Salida de puerto con FPSO**

Se trata de la condición de carga más crítica debido al peso de la misma y a sus dimensiones. Al disponer de poco peso de lastre, el centro de gravedad no se podrá modificar llenando tanques inferiores, por lo que en este tipo de transporte es de vital importancia el buen estudio de la carga. Los consumibles estarán al 100 % y los desechos al 10 %.

### **Salida de puerto con FPSO con factor de mala mar**

Ya que se trata de la condición más crítica de transporte, se ha decidido aplicar un factor de mala mar en el software maxsurf stability para poder analizar el comportamiento del buque con una altura de ola considerable.

### **Llegada a puerto con FPSO**

Las características son las mismas que las aplicadas en la condición 6.2.6, pero los consumibles estarán al 10% y los desechos al 80%.

### **Calado al puntal del buque con lastre**

Cuando el calado se encuentra al puntal del buque se considera una de las situaciones más críticas del proceso de inmersión y emersión. En especial debido a la carga de cubierta. Para ello se analiza primero el calado a puntal forzado con lastre, lo que corresponde al proceso de inmersión.



### **Calado al puntal con carga sobre cubierta**

Cuando la carga está en cubierta y el calado del buque esta justo al puntal se trata de un proceso especialmente crítico, perteneciente a la fase de emersión, en la que la carga ya no aporta flotabilidad al conjunto y todo su peso descansa sobre la cubierta de carga.

#### **a) Carga como peso puntual**

En este punto se considera la carga como un peso puntual en la cubierta de carga, por lo que no aporta flotabilidad al conjunto.

#### **b) Carga con flotabilidad**

Se ha añadido una carga con flotabilidad en cubierta, que aportará flotabilidad al conjunto.

### **Calado máximo sumergido**

Esta condición de carga es otra de las más críticas dentro del proceso operativo del buque. La reserva de flotabilidad del buque disminuye hasta los mínimos requeridos. Cualquier movimiento indeseado o no previsto podría hacer peligrar la estabilidad.

#### **a) Sin carga**

Al igual que en el apartado 6.2.9.1, se considera la carga como un peso puntual para poder analizar y discutir los resultados obtenidos de estabilidad.

#### **b) Carga que aporta flotabilidad**

Con la misma carga diseñada sobre cubierta que en el apartado 6.2.9.2 se realiza en análisis de estabilidad en esta condición.

## 7.3 Criterios de estabilidad

Dado que se estudiará el buque en condiciones de navegación y de operación, se ha recurrido a las normativas pertinentes. En el caso de la estabilidad en navegación, los criterios de estabilidad son los establecidos por la OMI.

Por otro lado, en condiciones de operación se recurre a la normativa utilizada durante el proyecto, DNV GL.

### 7.3.1 Criterios de estabilidad en navegación

Durante la navegación, los criterios aplicables de la OMI son aquellos determinados en la resolución MSC 278 (85) que establece criterios básicos de estabilidad en navegación para buques con un carácter bastante generalizado. [6]

- El área bajo la curva de GZ no será menor de 0.055 mrad a 30 grados ni menor de 0.09 mrad 40 grados.
- El GZ será mayor o igual a 0.20 m a 30 grados o superior.
- El máximo valor de GZ se dará en 30 o más grados, nunca menor de 25 grados.

*Cuando  $B/D > 2.5$  (como es el caso) se pueden aplicar los siguientes criterios alternativos:*

- El máximo valor del brazo adrizante debe encontrarse al menos en un Angulo de 15°.
- Área bajo la curva de brazos adrizantes no será menor de 0.07 mrad hasta los 15° no menor de 0.055 mrad hasta los 30°.

Por otro lado, dadas las características de operación especial de este tipo de buque, DNV GL Pt5 Ch7 [71] desarrolla otras normativas de seguridad en condiciones de inmersión y emersión.

- El valor de GZ Max será de 0.1 o mayor.
- El Gz positivo debe darse hasta los 15 o más grados.
- Angulo de escora al máximo GZ de al menos 7 grados.
- El GMto debe ser al menos de 0.3.

### 7.3.2 Estabilidad en condición de avería

En el presente capítulo se realizará el análisis probabilista y el determinista. La normativa que sigue será la aplicada al caso determinista, eso quiere decir que las situaciones de avería serán definidas en función de posibles accidentes que puedan ocurrir.

Según las reglas del DNV-GL Pt 5 Ch 10 Sc 5 [58], en condiciones de carga y descarga, se aplicarán unos mínimos requisitos admisibles en cuanto a su estabilidad en avería.

- La avería se considerará en aquellas zonas que sean susceptibles de ceder ante movimientos no deseados de la carga. Se tomará por tanto inundación del castillo de proa, de los *casings* de popa y de la sala de máquinas.
- Los tanques afectados quedarán se consideran inundados en su totalidad con una permeabilidad del 95%.
- El rango de GZ positivos deber ser de al menos hasta los 7º
- Valor mínimo de GZ=0.05
- El ángulo de escora no será superior a 15º o aquel en que pueda embarcar agua por encima de cualquier compartimento estanco.
- Horizontalmente se prevé una extensión del daño de máximo 5 m, verticalmente indefinido a partir de la cubierta de carga. Máxima profundidad del daño=0.76 m.

Se analizará 4 situaciones distintas en condiciones de inmersión/emersión. Con calado al puntal y al máximo sumergido, en ambas con y sin carga.

## 7.4 Hidrostáticas del buque

A continuación, se muestran las tablas con los datos hidrostáticos para los calados más significativos del buque. En ellas se pueden ver valores como el desplazamiento del buque, el ángulo de escora y trimado, los coeficientes adimensionales y las distintas distancias entre puntos importantes de la estabilidad.

### 7.4 1 Valores hidrostáticos en los calados representativos

<b><math>\nabla</math></b>	61240	104314	88252	51804	T
<b>Escora</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	º
<b>Tpr</b>	9.190	21.840	12.510	8.020	m
<b>Tpp</b>	9.190	21.840	12.510	8.020	m
<b>Ccm</b>	9.190	21.840	12.510	8.020	m
<b>Trimado</b>	0.000	0.000	0.000	8.020	m
<b>Lfl</b>	188.574	187.091	182.541	187.803	m
<b>B</b>	44.881	44.881	44.878	44.878	m
<b>Am</b>	10264.542	19611.204	18052.769	9742.760	m <sup>2</sup>
<b>Sección de obra viva</b>	7897.541	1760.518	1654.249	7829.832	m <sup>2</sup>
<b>Cp</b>	0.778	0.560	0.849	0.759	
<b>Cb</b>	0.768	0.555	0.840	0.747	
<b>Cm</b>	0.990	0.993	0.989	0.989	
<b>Cfl</b>	0.933	0.210	0.202	0.929	
<b>Cc</b>	96.853	102.369	94.427	98.47	m
<b>Cwl</b>	88.168	148.964	138.545	87.84	m
<b>KB</b>	5.030	8.433	6.811	4.379	m
<b>KG</b>	9.190	9.190	9.190	7.59	m
<b>BMt</b>	21.355	2.839	3.259	24.98	m
<b>BML</b>	344.976	50.901	62.414	397.684	m

<b>GMt</b>	17.195	2.082	0.880	21.69	m
<b>GML</b>	340.816	50.144	60.036	394.47	m
<b>KMt</b>	26.385	11.272	10.070	29.28	m
<b>KML</b>	350.006	59.334	69.226	385.91	m
<b>Inmersión</b>	80.950	18.045	16.956	402.063	t/cm
<b>MTc</b>	1118.526	280.318	283.937	80.256	t/m
1095.124					

**Tabla 39, valores hidrostáticos a los distintos calados**

## 7.4.2 Curvas de áreas en los distintos calados representativos

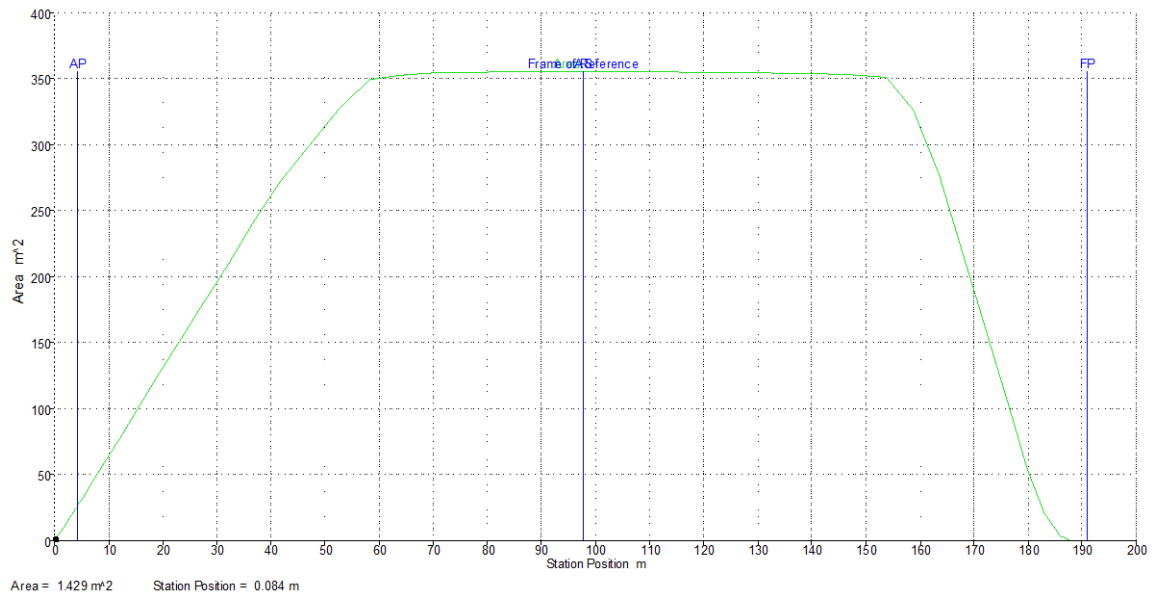


Figura 74, curva de áreas con un calado de 7.9 m

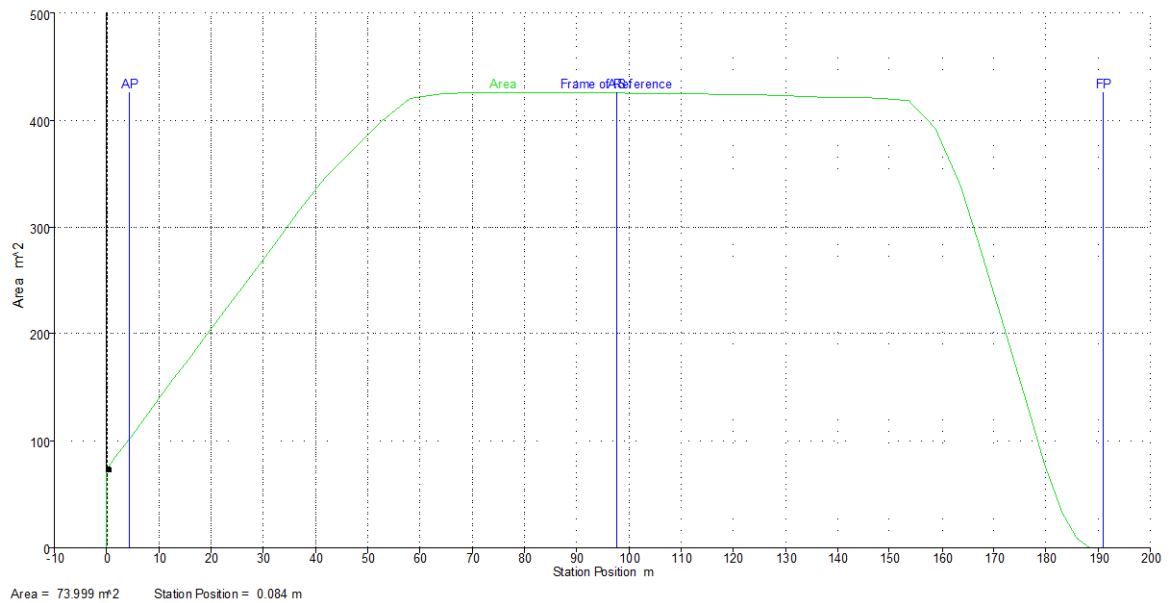


Figura 75, curva de áreas con un calado de 9.2 m

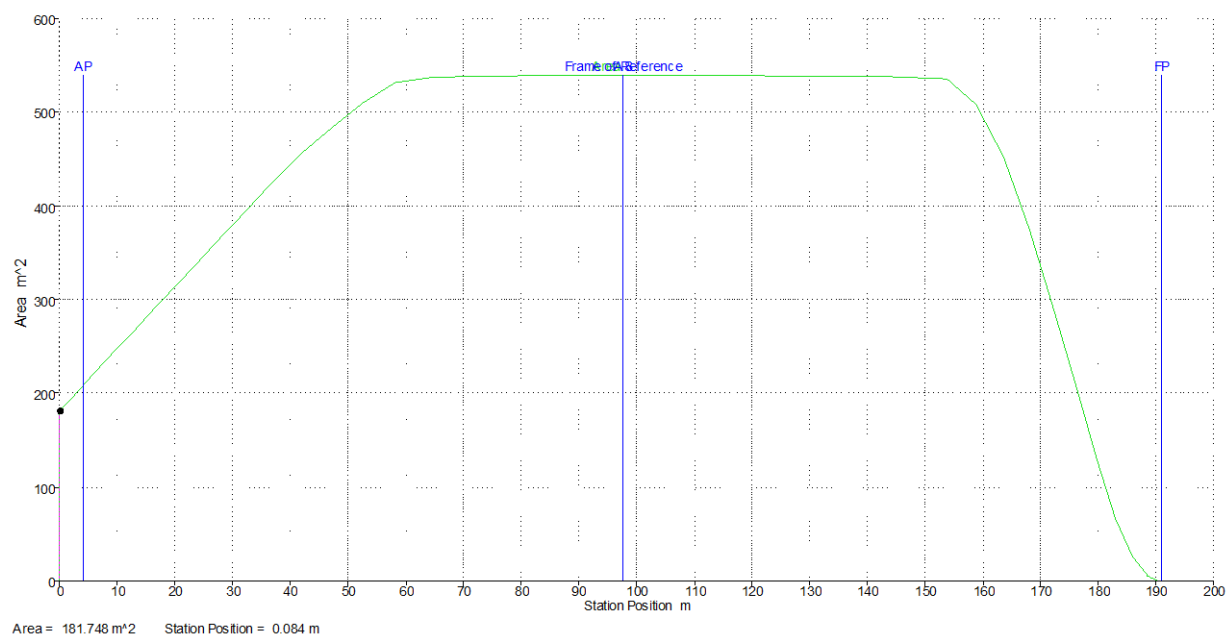


Figura 76, curva de áreas con un calado de 12.5 m

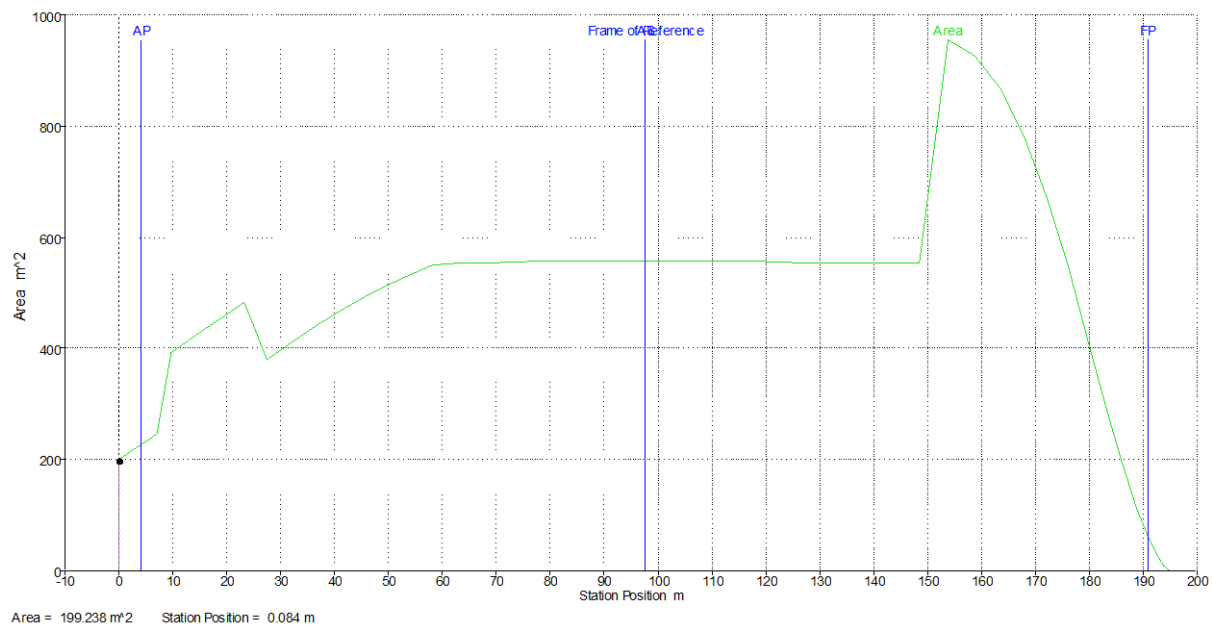


Figura 77, curva de áreas con un calado de 21.8 m

De las anteriores curvas de áreas se puede comprobar como las formas del buque son muy verticales en los costados, es decir, las cuadernas son en forma de U. Es por esa razón que los 3 primeros calados no provocan una variación significativa en las curvas.

Por otro lado, en la última imagen se puede apreciar dos picos de área, uno en popa y otro en proa, que representan los volúmenes extras de flotabilidad al calado máximo sumergido.

## **7.5 Cálculos de estabilidad**

Para llevar a cabo los análisis se recurre al software de maxsurf stability, donde ya se han dispuesto los tanques y pesos necesarios a tener en cuenta. Para más información relativa a los resultados obtenidos del programa utilizado se puede consultar el anexo 3.

### **7.5.1 Consideraciones**

- Gracias a los numerosos tanques de lastre se forzará un trimado nulo o menor del 2% y una escora nula.
- Se analizarán los todos aquellos calados que se consideren representativos del procedimiento operativo del buque.
- Se han escogido dos cargas posibles a transportar, una de bajo peso y alto Cg (módulo de grúas) y otra de alto peso y bajo Cg (FPSO).
- Para cada calado se estudiará la salida de puerto y la llegada, con valores del 97% de llenado y un 10 % de vacío.
- Según la OMI [6] se tomará el valor de superficies libres máximo por cada pareja simétrica de tanques, el resto será nulo.



- Se realizan los siguientes análisis importantes: *equilibrium*, *Large angle stability* y *Longitudinal strength*.<sup>12</sup>
- Para realizar el análisis de resistencia longitudinal, las cargas insertadas en el programa se han dividido a lo largo de las zonas de apoyo.

A continuación, se muestran las curvas de brazos adrizantes obtenidos para cada situación de carga y calado, seguido de una tabla que compara los obtenidos con los mínimos requeridos por sociedad de clasificación.

---

<sup>12</sup> Este último se realizará solamente de la situación de carga más crítica propuesta, de dónde derivarán las mayores tensiones producidas en el buque.

## 7.5.2 Calado mínimo

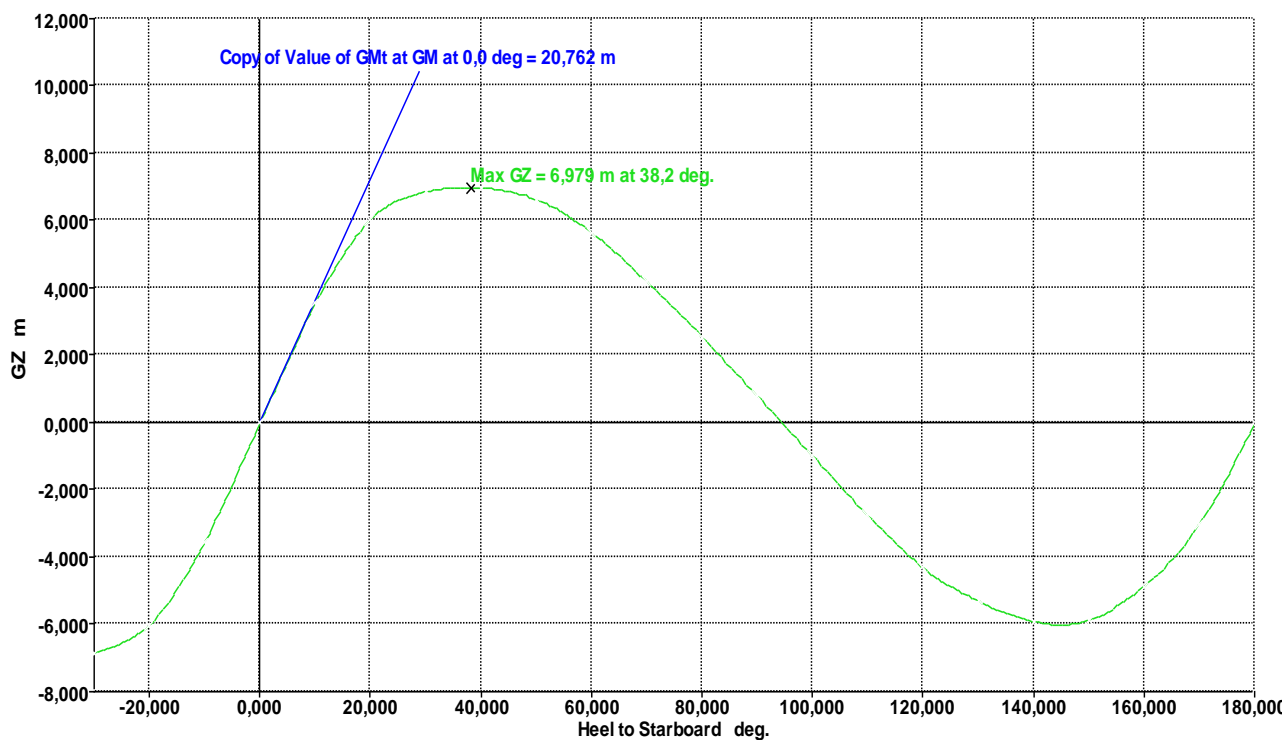


Figura 78, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	132.55/201.97	Pass
Gz a 30º+	0.2	6.84	Pass
Ángulo de Max Gz	15º	38.2º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	20.76	Pass

Tabla 40, criterios de cumplimiento

### 7.5.3 Salida de puerto con lastre

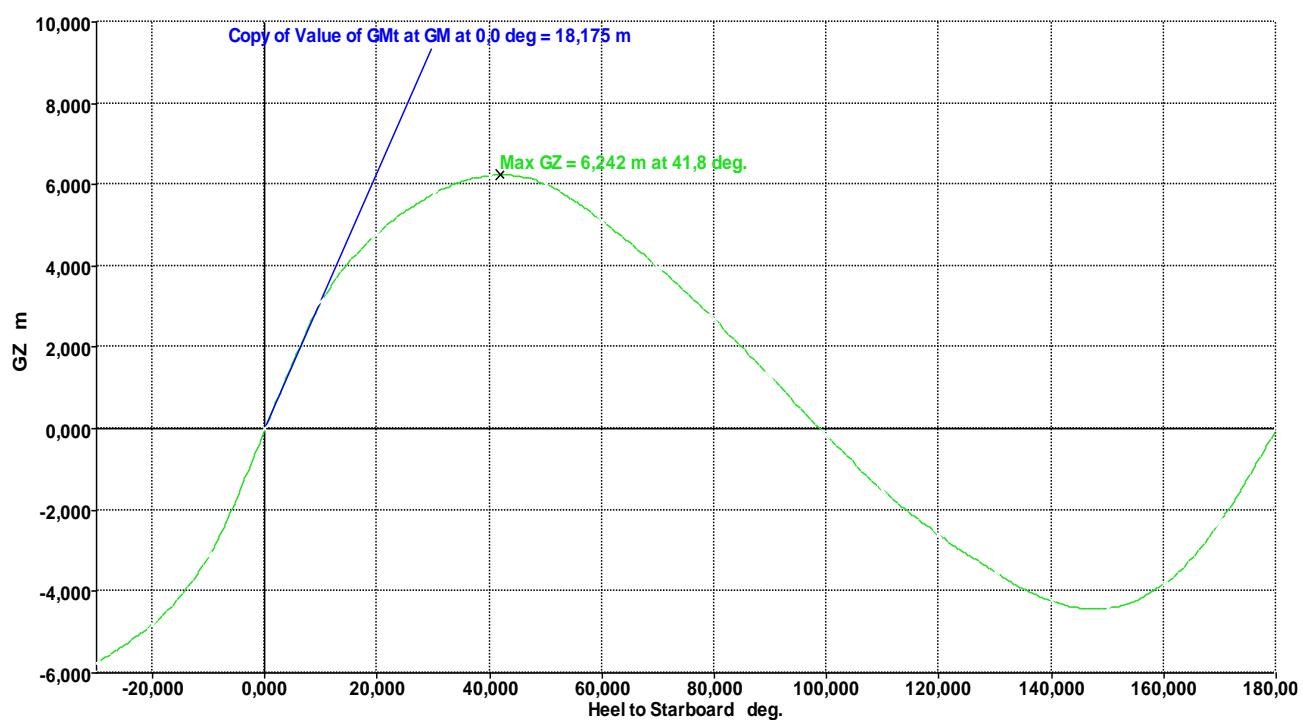


Figura 80, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	110.11/170.56	Pass
Gz a 30º+	0.2	5.76	Pass
Angulo de Max Gz	15º	41.8º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	18.17	Pass

Tabla 41, criterios de cumplimiento

#### 7.5.4 Llegada a puerto con lastre

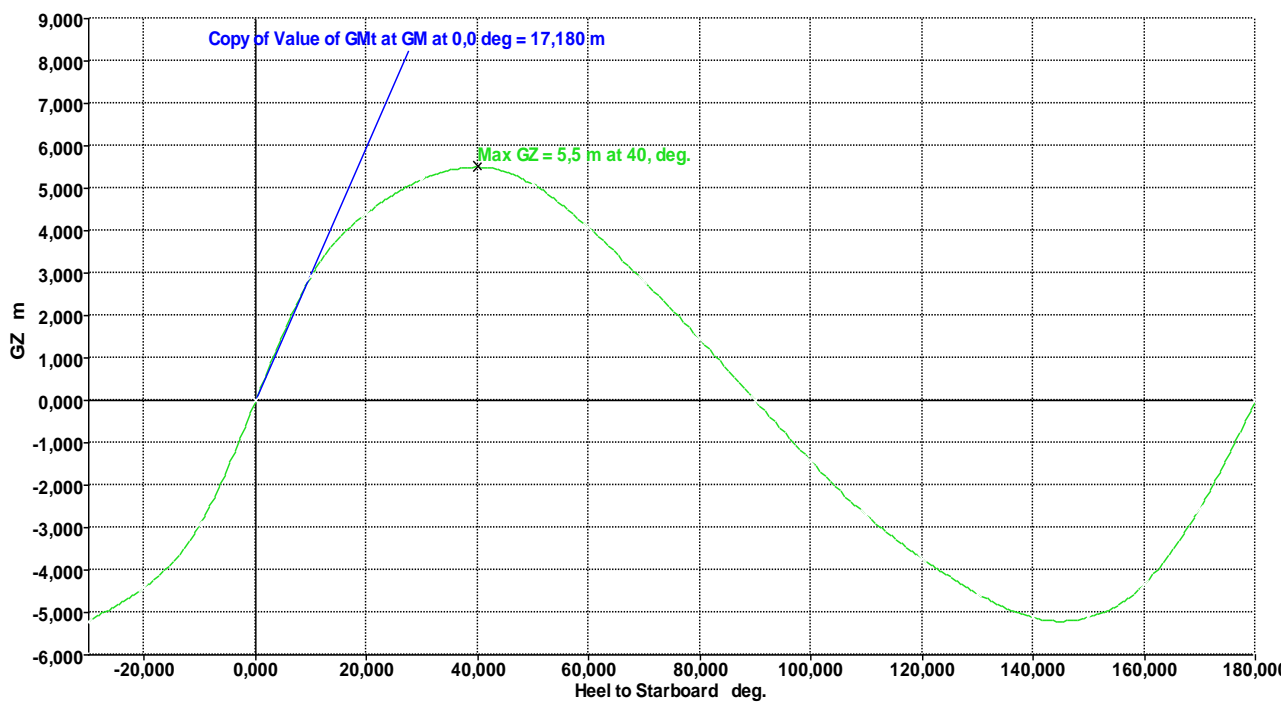


Figura 81, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	101.47/155.46	Pass
Gz a 30º+	0.2	5.19	Pass
Angulo de Max Gz	15º	40º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	17.18	Pass

Tabla 42, criterios de cumplimiento

### 7.5.5 Salida de puerto con módulo de grúas

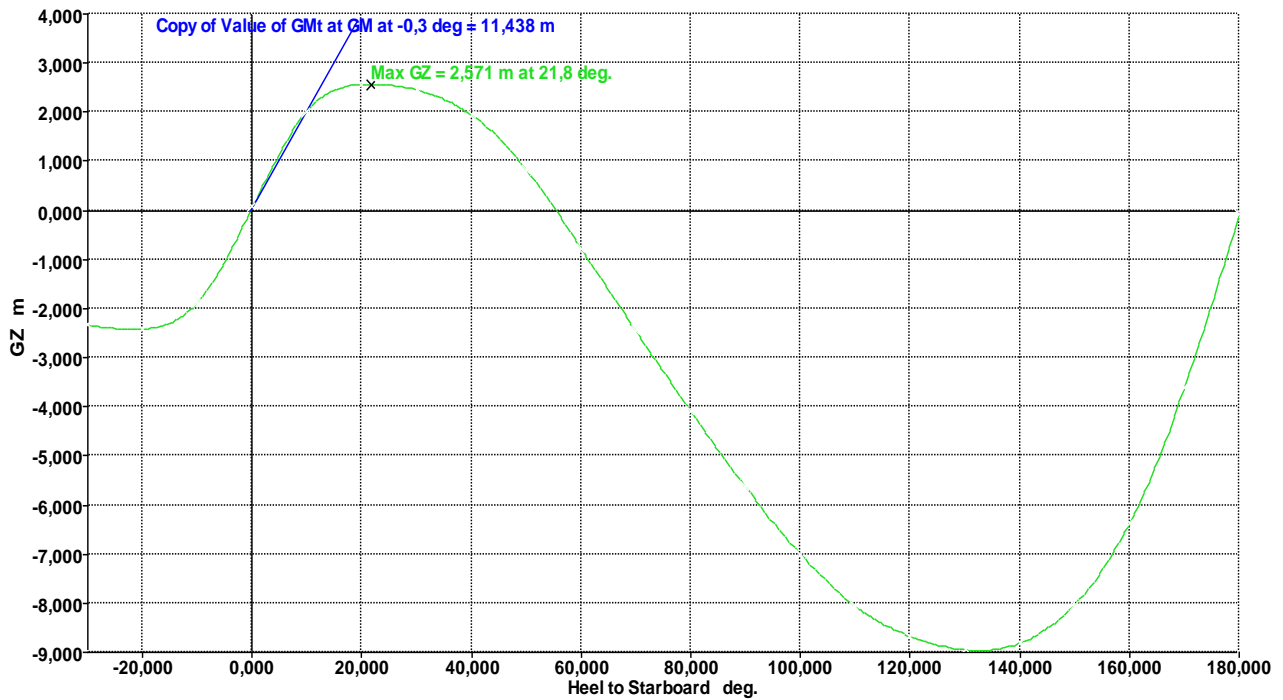


Figura 82, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	60.66/83.08	Pass
Gz a 30º+	0.2	2.45	Pass
Ángulo de Max Gz	15º	21.8º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	11.43	Pass

Tabla 43, criterios de cumplimiento

### 7.5.6 Llegada a puerto con módulo de grúas

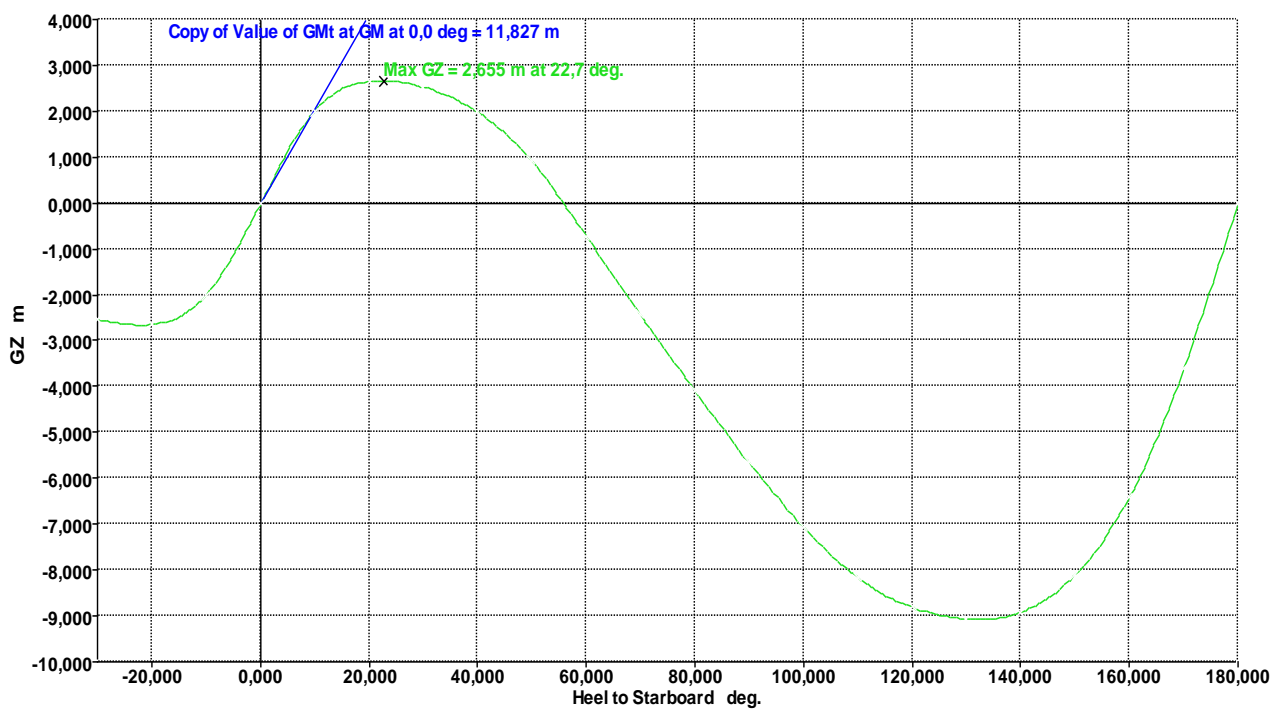


Figura 83, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	61.30/84.26	Pass
Gz a 30º+	0.2	2.52	Pass
Angulo de Max Gz	15º	22.7º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	11.82	Pass

Tabla 44, criterios de cumplimiento

### 7.5.7 Salida de puerto con FPSO

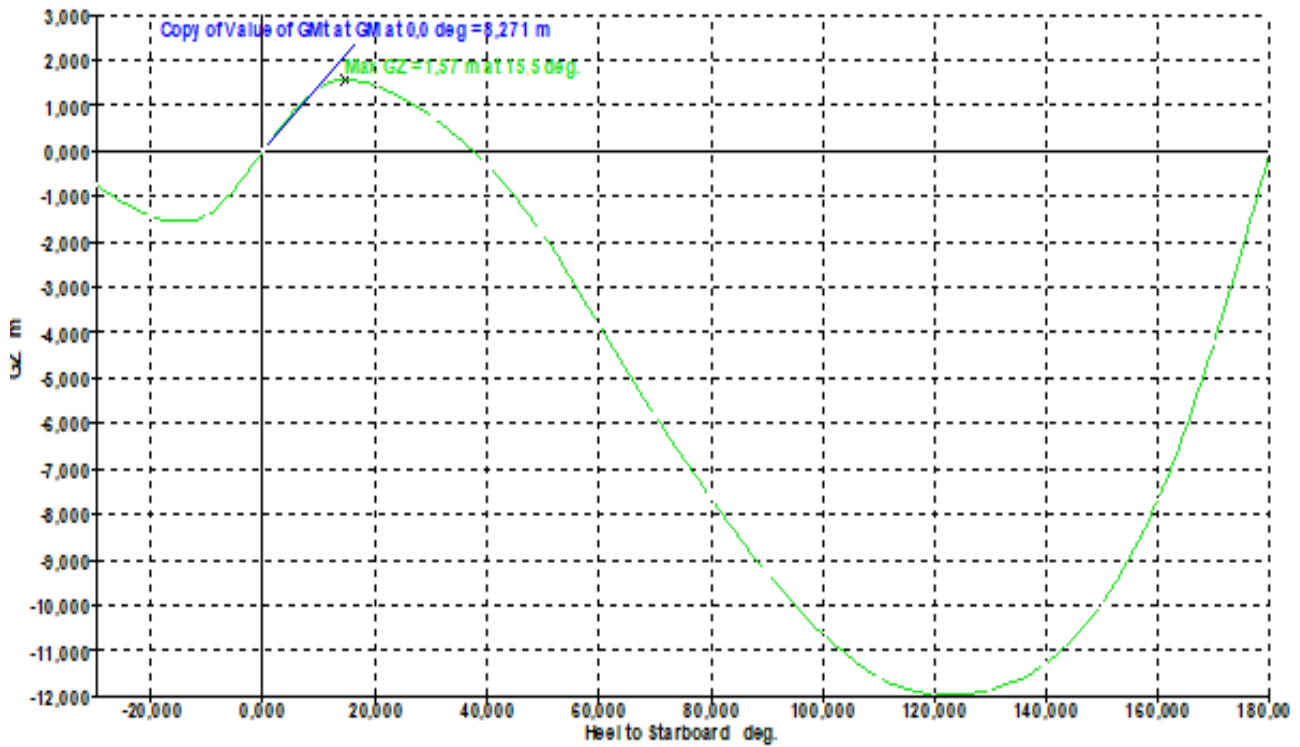


Figura 84, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	34.32/36.93	Pass
Gz a 30º+	0.2	0.76	Pass
Angulo de Max Gz	15º	15.5º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	8.27	Pass

Tabla 45, criterios de cumplimiento

## Salida de puerto con mala mar

Se ha probado a añadir un componente de olas en el programa para poder observar el comportamiento de la estabilidad en la mar en una situación más cercana a la realidad.

Para ello se le ha añadido un patrón de ola de longitud igual a la eslora del buque y de altura de 4m.

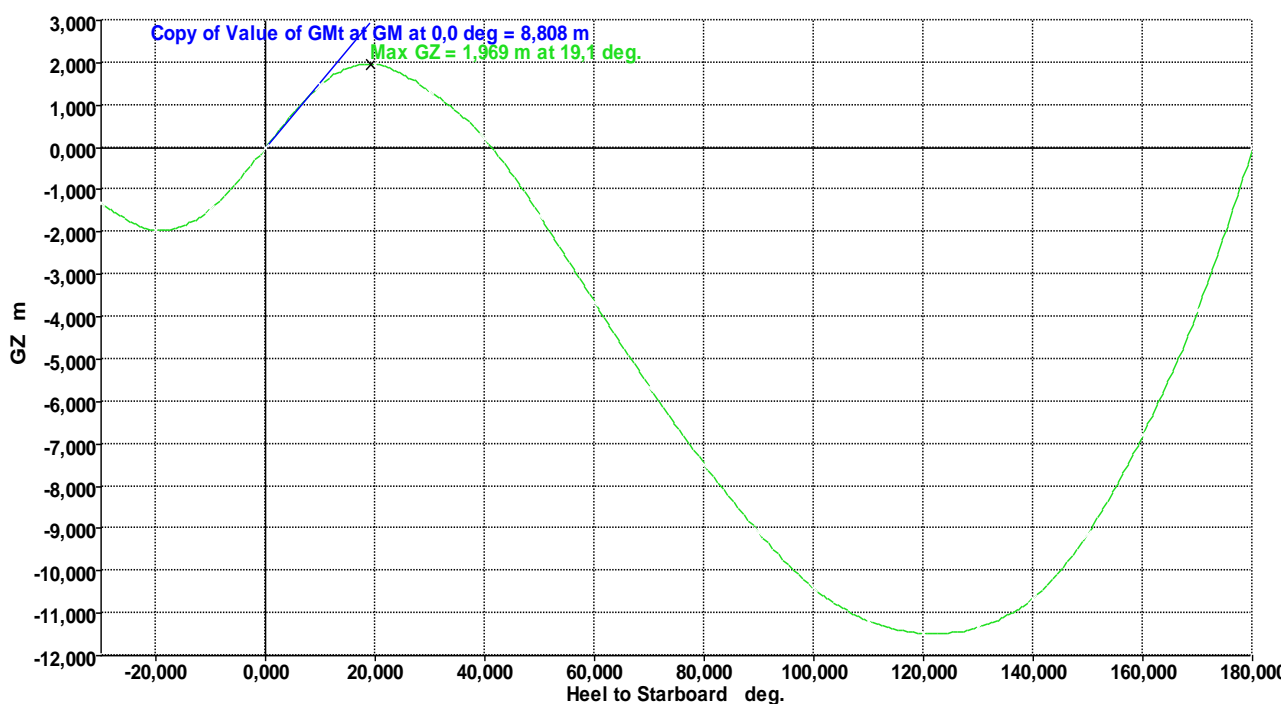


Figura 85, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	42.98/51.09	Pass
Gz a 30º+	0.2	1.32	Pass
Angulo de Max Gz	15º	19.1º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	8.88	Pass

Tabla 46, criterios de cumplimiento



### 7.5.8 Llegada a puerto con FPSO

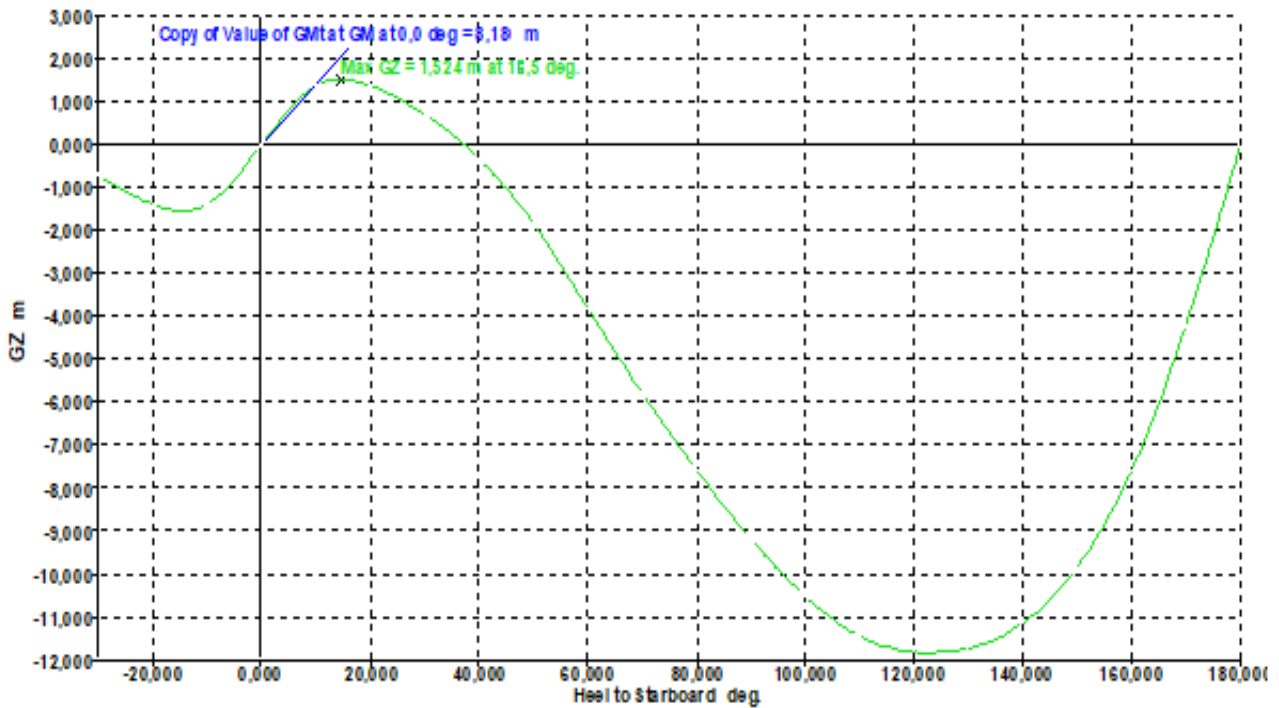


Figura 86, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Área debajo de Gz a 30º/40º	3.15/5.15	33.10/35.37	Pass
Gz a 30º+	0.2	0.71	Pass
Angulo de Max Gz	15º	16.5º	Pass
Altura metacéntrica	0.15	8.18	Pass

Tabla 47, criterios de cumplimiento

### 7.5.9 Calado al puntal con lastre

En los análisis de estabilidad que siguen los criterios cambian, pasando a tomarse los requeridos por DNV Pt 5 Ch 7 [71] en situaciones de carga y descarga/inmersión y emersión.

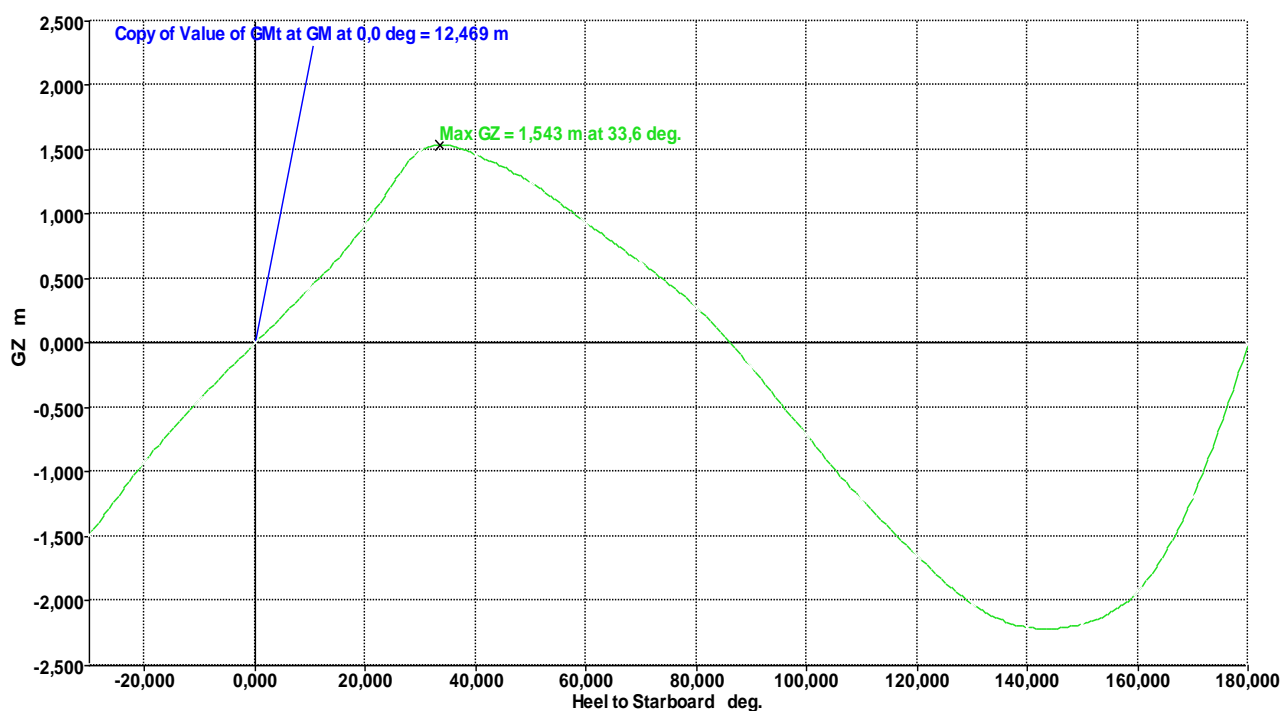


Figura 87, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Rango Gz positivos	15º+	+80º	Pass
Gz a 15º+	0.1	0.79	Pass
Angulo de Max Gz	7º	33.8º	Pass
Altura metacéntrica	0.3	12.46	Pass

Tabla 48, criterios de cumplimiento

## 7.5.10 Calado al puntal con carga

### 7.5.10.1 Carga puntual

En este caso se implementan dos situaciones. En la primera se ha llevado a cabo el análisis lastrando el buque hasta el puntal y con un peso puntual en cubierta.

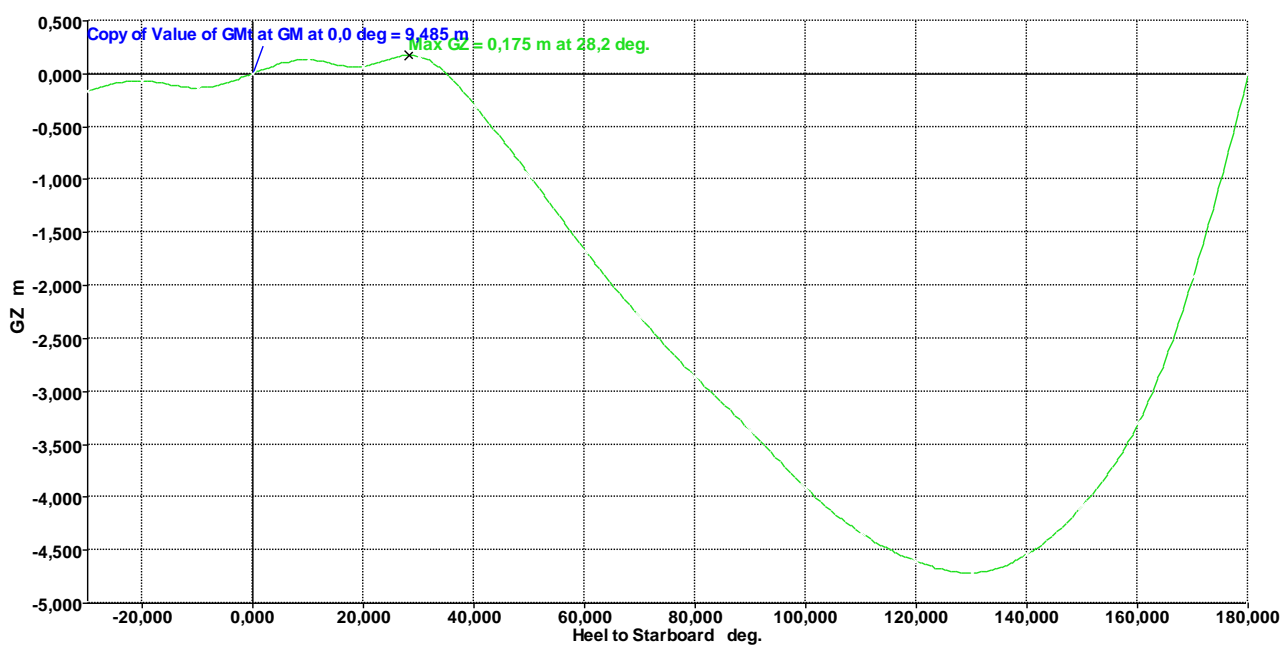


Figura 88, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Rango Gz positivos	15º+	+30º	Pass
Gz a 15º+	0.1	0.123	Pass
Angulo de Max Gz	7º	38.2º	Pass
Altura metacéntrica	0.3	8.38	Pass

Tabla 49, criterios de cumplimiento

El inconveniente en esta situación es que al escorar el buque no existe ningún volumen de flotabilidad (de la carga) que ayude al adrizamiento de este. Es por eso por lo que, aunque los valores aparentemente cumplen, no se podría considerar una situación real.

#### 7.5.10.2 Carga dando flotabilidad

Para conseguir el efecto de la flotabilidad se ha diseñado una nueva estructura de buque-carga conjunta, en el mismo archivo de *maxsurf stability*. Quedando como se muestra en la figura a continuación:

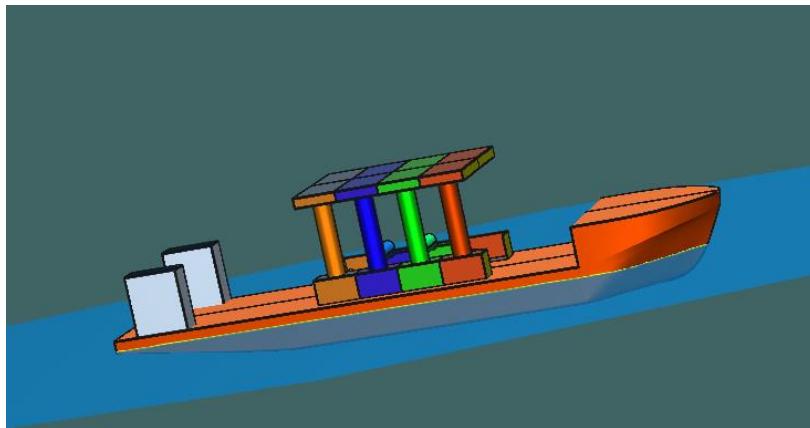


Figura 89, modelo de *maxsurf* con una FPSO

Posteriormente se ha realizado el cálculo del análisis de estabilidad (Large angle stability) y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

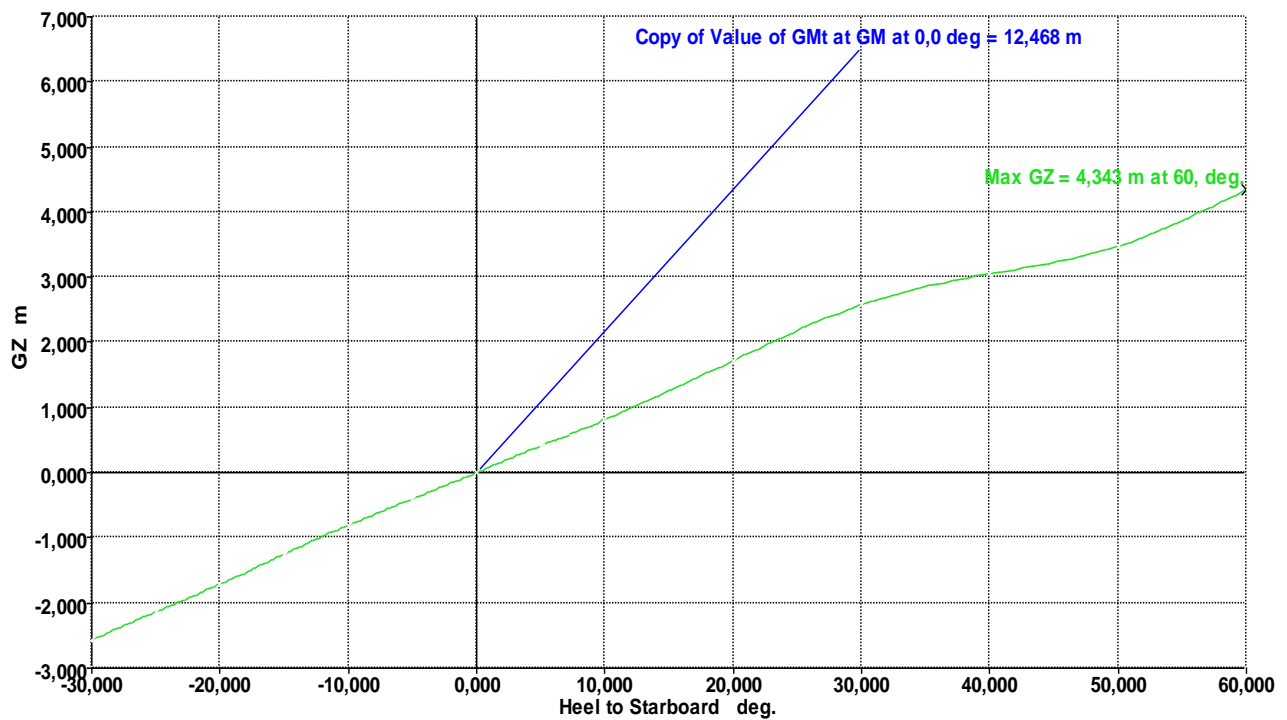


Figura 90, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Rango Gz positivos	15º+	+30º	Pass
Gz a 15º+	0.1	1.33	Pass
Angulo de Max Gz	7º	+60º	Pass
Altura metacéntrica	0.3	12.46	Pass

Tabla 50, criterios de cumplimiento

### 7.5.11 Calado máximo sumergido

En esta situación se realizan los análisis pertinentes a dos situaciones de calado máximo, una sin carga y usando lastre y la siguiente con una carga sobre cubierta.

#### 7.5.11.1 Calado máximo lastrando el buque

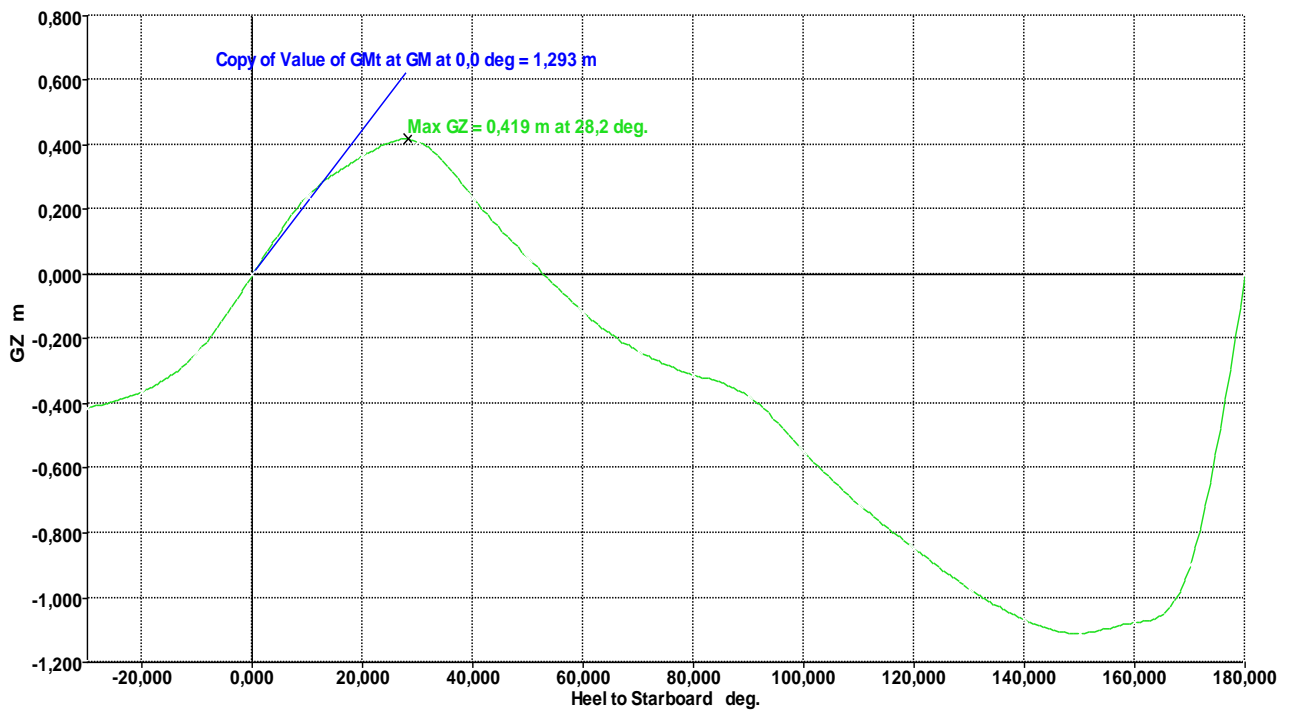


Figura 91, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
Rango Gz positivos	15º+	50º	Pass
Gz a 15º+	0.1	0.302	Pass
Angulo de Max Gz	7º	38.2º	Pass
Altura metacéntrica	0.3	1.28	Pass

Tabla 51, criterios de cumplimiento

#### 7.5.11.2 Calado máximo con carga aportando flotabilidad

La carga utilizada es la misma que en el análisis de la estabilidad cuando el calado esta al puntal del buque.

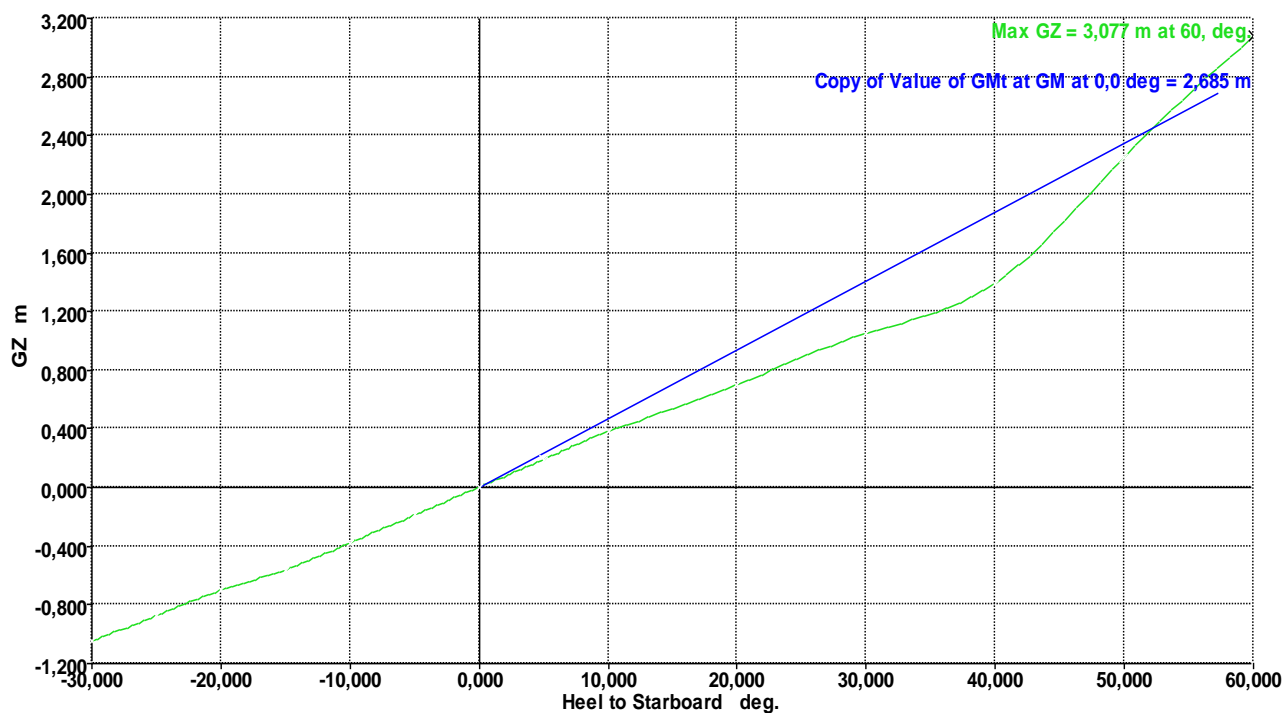


Figura 92, brazo adrizante obtenido

	Criterio	Resultados	Cumplimiento
<b>Rango Gz positivos</b>	15º+	+60º	Pass
<b>Gz a 15º+</b>	0.1	0.5	Pass
<b>Angulo de Max Gz</b>	7º	+60º	Pass
<b>Altura metacéntrica</b>	0.3	2.68	Pass

**Tabla 52, criterios de cumplimiento**

## 7.6 Discusión de los resultados obtenidos

De los análisis realizados hasta el momento se pueden sacar una serie de conclusiones. A continuación, se amplía la información obtenida de los resultados y se discute ciertos aspectos de estos.

Por lo que se ha podido observar, y ya se ha comentado en anteriores capítulos, la estabilidad de este tipo de buques tiene un amplio rango de variación dado la gran cantidad de cargas y geometrías diversas que puede transportar sobre cubierta. Para cada caso de transporte se debe realizar un análisis de la estabilidad muy preciso, teniendo en cuenta el tipo de buque, la carga, condiciones ambientales, calados, estiba, elementos auxiliares, equipo de persona y maquinaria, y análisis de carga/descarga/transporte.

Teniendo en cuenta estas peculiaridades de los análisis de estabilidad, se pueden establecer algunas ideas generales:

- En condiciones de navegación, tanto en lastre como con una carga en cubierta, los criterios mínimos de estabilidad se cumplen sin dificultad. Esto es debido a la gran cantidad de agua de lastre que puede hacer bajar el Cg total del buque y, por tanto, aumentar su estabilidad.
- Las cargas más difíciles de transportar son aquellas que presenten un Cg especialmente elevado o un peso extremo. Cada buque de esta categoría tendrá unas cargas máximas, tanto en altura como peso, que podrá transportar y que serán representativas de su límite de operación.
- Las situaciones más críticas son aquellas en las que el buque está en proceso de inmersión o emersión.
- Con los métodos de los que se dispone en el actual proyecto, es imposible evaluar la estabilidad resultante del buque en las distintas fases de operatividad, dado a los múltiples factores que intervienen y a la dificultad de contabilizarlos en el software naval *Maxsurf* que se ha usado durante el proyecto.



- Cuando el buque está al calado máximo sumergido se ha analizado dos situaciones, una con un peso puntual sobre cubierta y otro con una carga diseñada y colocada sobre cubierta. Los resultados obtenidos no son fiables en ninguno de ambos casos. Esto es debido a que la carga aporta flotabilidad, pero no tanto como si se tratase de una extensión del mismo buque.
- Solo se ha tenido en cuenta la estabilidad del buque, pero si la carga izada es también flotante, ésta deberá mantenerse estable hasta estar completamente apoyada sobre la cubierta de carga del buque, si no, podría perder estabilidad y escorar hasta un punto de no retorno.
- De la serie de análisis realizados se deriva también una conclusión, y es que la capacidad de carga del buque y su capacidad de izado de carga no son ni remotamente parecidas. La capacidad de izado de carga depende del lastre disponible, que es inferior a la capacidad de carga real en transporte que puede llegar a transportar este tipo de embarcaciones.

## 7.7 Análisis de estabilidad en avería

Para realizar el análisis de estabilidad en avería se toma en consideración que el fallo de la estabilidad puede darse en dos condiciones distintas, bien cuando el buque está en navegación o bien cuando está operando en puerto.

En el presente apartado se explicarán los cálculos desarrollados para cada una de las condiciones y se mostrarán los resultados obtenidos en cada caso.

Para más información sobre los cálculos realizados con el software *Maxsurf Stability* se puede consultar el anexo 4.

### 7.7.1 Estabilidad en avería durante la navegación

Durante la navegación, en análisis por averías se hace siguiendo la normativa de la OMI MSC 216(82).

La estabilidad en averías se analiza a través de un método que calcula las probabilidades de que el buque siga estable/intacto después de una avería. Dicho método se desarrolla gracias al software *maxsurf stability*, que aplica los siguientes criterios.

- El índice de compartimentado obtenido “A” será mayor que el índice de compartimentado requerido “R”.
- El índice “A” resulta de la suma de los subíndices  $A_i$  obtenidos a partir de 3 calados representativos en la navegación, como son el mínimo, el de diseño y el máximo.
- Cada uno de los subíndices deberá ser mayor que 0.5R.

Los valores comentados los encuentra el programa por nosotros, pero antes hay que definir una serie de condiciones para que el análisis se pueda realizar.

- Seleccionar los 3 calados representativos en navegación. Estos son 8m, 9.2m y 9.7 metros.
- Seleccionar el tipo de buque, bien de pasajeros o bien de carga.

- Implementar divisiones longitudinales, coincidentes con los tanques de lastre.
- Implementar divisiones transversales, coincidiendo con los tanques de lastre.
- Separar la altura en función del número de cubiertas.
- Estipular el porcentaje de inundación de cada compartimento
- Se le dice al programa que considere un máximo de 3 zonas adyacentes susceptibles de inundarse.
- Fijar un máximo valor de trimado al que calcularle la estabilidad, igual que a la escora.

	Item	Value	Units
1	<i>Probabilistic damage</i>		
2	Resolution -- MSC.216(82) or MSC.19(58)	MSC.216(82)	
3	Do automatic combinations of vertical damage ?	Yes	
4			
5	<i>Loadcases</i>		
6	Deepest subdivision draft (summer loadline) Loadcase	calado verano	draft: 9.607 m
7	Partial subdivision draft Loadcase	Lastre Salida	
8	Light service draft Loadcase	calado minimo	
9			
10	<i>Vessel parameters</i>		
11	Type -- Cargo or Passenger	Cargo	
12	Subdivision length L <sub>s</sub>	195.600	m
13	Aft terminal of L <sub>s</sub>	0.000	m
14	Fwd terminal of L <sub>s</sub>	195.600	m
15	Mid L <sub>s</sub>	97.800	m
16	max. moulded breadth at or below deepest subdivision draft	44.882	m
17	max. number of adjacent zones to consider		
18	min. probability (p.r.v) of damage to consider	0.00100	
19	max. trim angle to consider	25.0	deg
20	Limit longitudinal extent of damage? (L <sub>max</sub> =60.000; J <sub>max</sub> =	Limit	
21	Limit vertical extent of damage?	Limit	
22	max. vertical extent of damage	22.107	m
23	Damaged side -- Starboard or Port	Starboard	
24	Zone 1 located at bow or stern?	Stern	
25			
26	<i>MSC.216(82) -- Required subdivision index</i>		
27	Cargo ships over 80m: R (formula depends on length)	0.63176	
28	Reduction factor for R	1.000	
29	Required subdivision index (applying reduction factor)	0.63176	
30	Factor of R for required subdivision index for each loadcase	0.900	
31	Required subdivision index for each loadcase	0.56858	
32			
33	<i>Constants</i>		
4	Damage Cases	Global	Zones Long. Bhds Decks p Factors r Factors v Factors

Figura 93, ventana del programa para establecer parámetros básicos

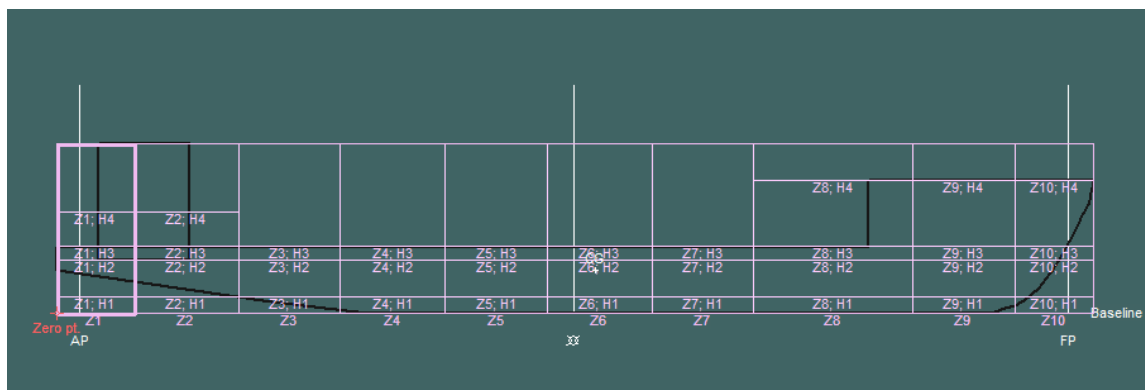


Figura 94, división del buque en zonas

Una vez todos los valores y parámetros se han determinado, el software halla la probabilidad de que ocurra una avería y se extienda en diferentes zonas del buque (p) y también la probabilidad de supervivencia(s).

De estos dos índices obtenidos, se obtiene el índice A, que como se ha comentado anteriormente deberá ser superior a R.

Una vez concluido el análisis, los valores que proporciona el programa se dan en la tabla a continuación.

	R	A	Criterio
<b>Calado de verano</b>	0.5685	0.8422	Pass
<b>Calado medio</b>	0.5685	0.8636	Pass
<b>Calado mínimo</b>	0.5685	0.8764	Pass
<b>Total</b>	0.6317	0.8576	Pass

Tabla 53, criterios de cumplimiento

Las probabilidades de avería se extraen de estadísticas de accidentes reales que posee el programa.

### 7.7.2 Estabilidad en avería durante operaciones

Se analizará 4 situaciones distintas en condiciones de inmersión/emersión. Con calado al puntal y al máximo sumergido, en ambas con y sin carga.

#### Avería en el castillo de proa

Se considera cualquier situación en la que un movimiento indeseado de la carga pudiera provocar la rotura del casco y por consiguiente la inundación de los compartimentos estancos directamente colindantes al lugar del fallo.

Se ha considerado que, en el caso de inundación de castillo de proa, se inundarán los compartimentos del doble casco i aquellos inmediatamente seguidos,

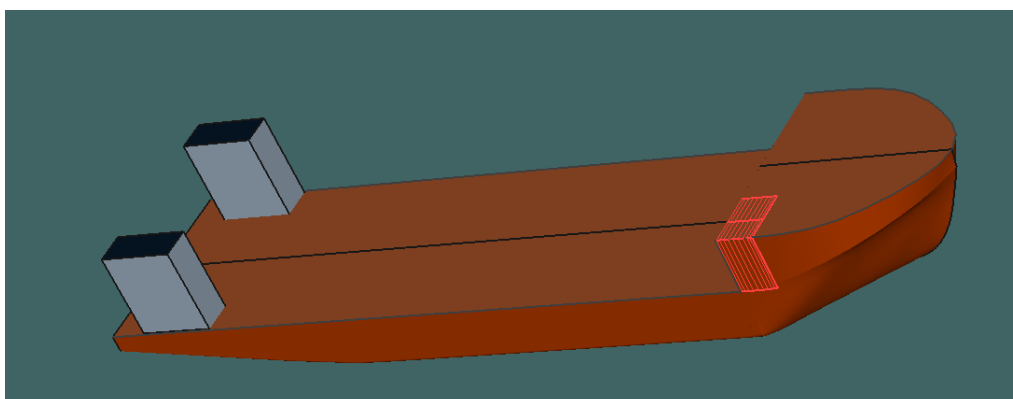
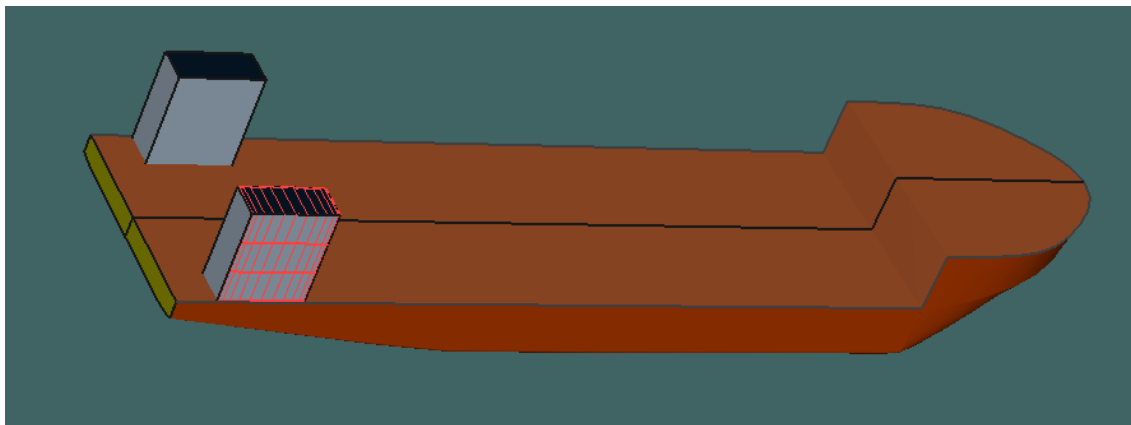


Figura 95, avería en el castillo de proa

#### Avería en el casing de popa

La inundación de los casings de popa es uno de los fallos que más puede comprometer la estabilidad en condición de operación.

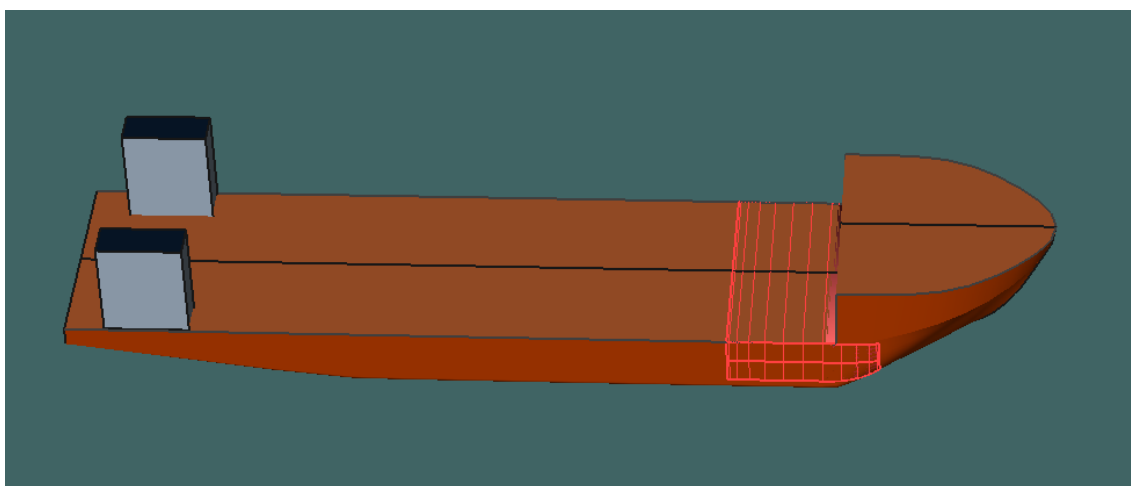
Por otro lado, estas reservas de flotabilidad suelen ser desmontables, por lo que en caso de avería grave se pueden separar físicamente del resto del buque.



**Figura 96, avería en casings de estribor**

#### **Avería en la sala de máquinas**

Por estar parcialmente debajo de la cubierta de carga y estar dotada de doble costado, se ha considerado un porcentaje de inundación del 80% de la sala de máquinas, de acuerdo con la normativa seguida.



**Figura 97, avería en la sala de máquinas**

### 7.7.2.1 Avería en el castillo de proa

a) Calado máximo sumergido con lastre

<b>T</b>	21,231	<b>m</b>
<b>∇</b>	101451	<b>T</b>
<b>Escora</b>	-1,2	<b>º</b>
<b>Tpr</b>	21,075	<b>m</b>
<b>Tpp</b>	21,387	<b>m</b>
<b>Tm</b>	21,150	<b>m</b>
<b>Trimado</b>	0,312	<b>m</b>

Tabla 54, datos de equilibrio hidrostático obtenido

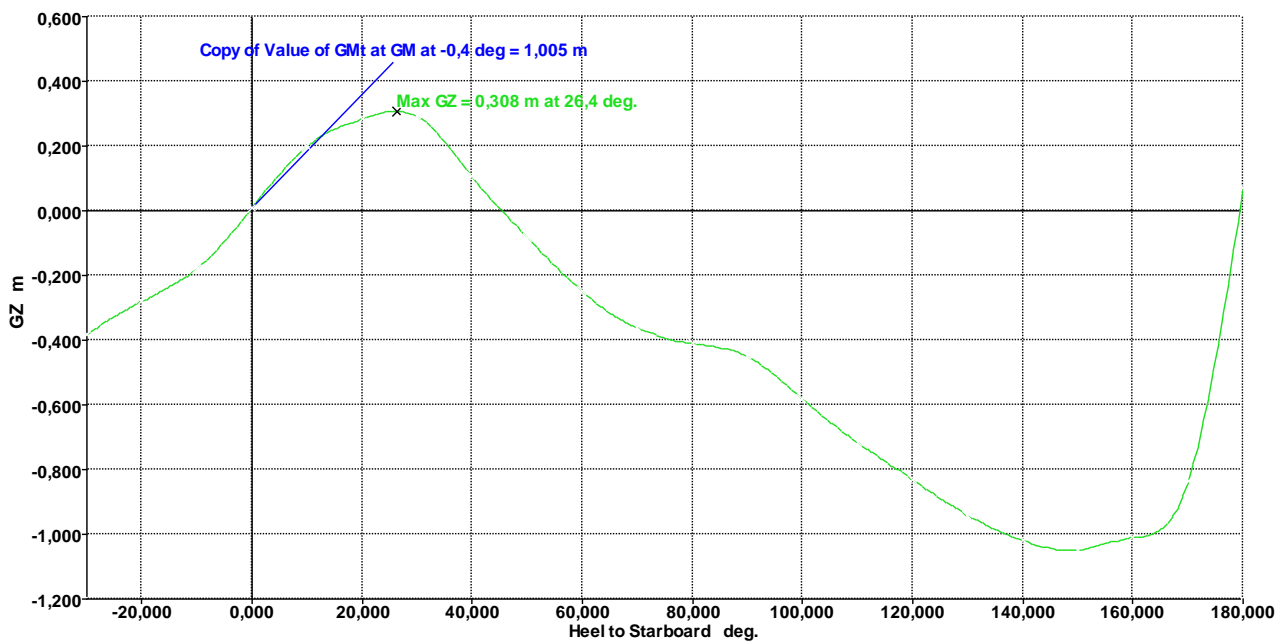


Figura 98, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	0.30	Pass
Escora máxima	15º	1.2º	Pass

Tabla 55, criterio de cumplimiento

b) Calado máximo sumergido con carga

La figura muestra la curva de áreas del buque con carga cuando este se encuentra sumergido a su calado máximo. Se puede observar como el volumen de flotabilidad aumenta considerablemente.

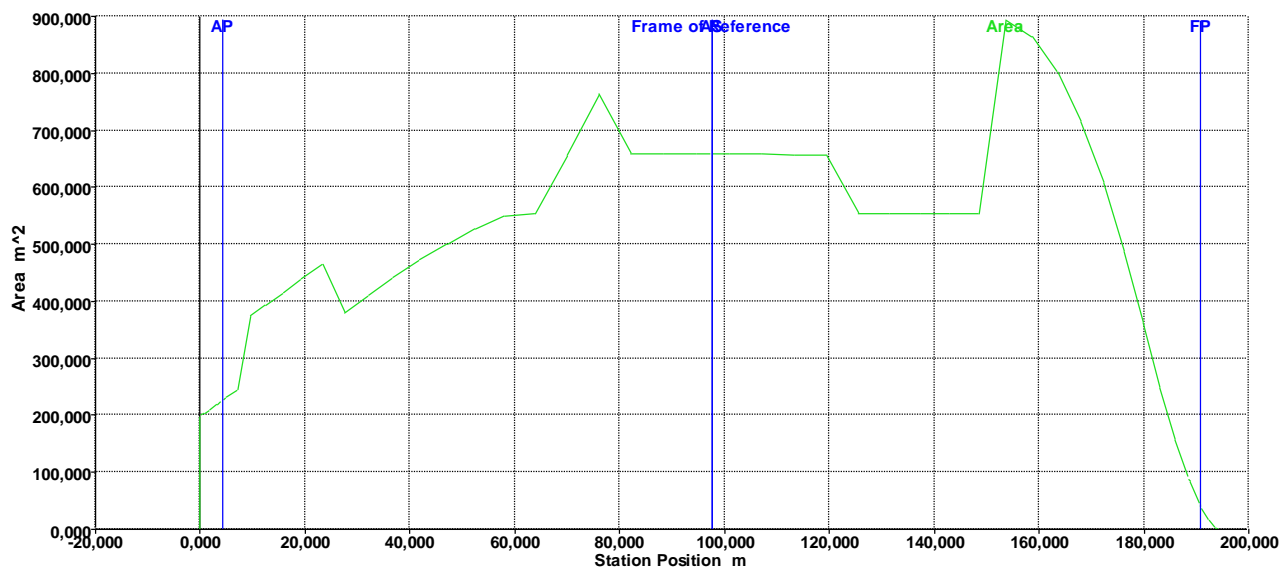


Figura 99, curva de áreas obtenida



<b>T</b>	20.184	m
<b>V</b>	106834	T
<b>Escora</b>	-0.8	º
<b>Tpr</b>	20.039	m
<b>Tpp</b>	20.330	m
<b>Tm</b>	20.137	m
<b>Trimado</b>	0.292	m

Tabla 56, datos de equilibrio hidrostático obtenido

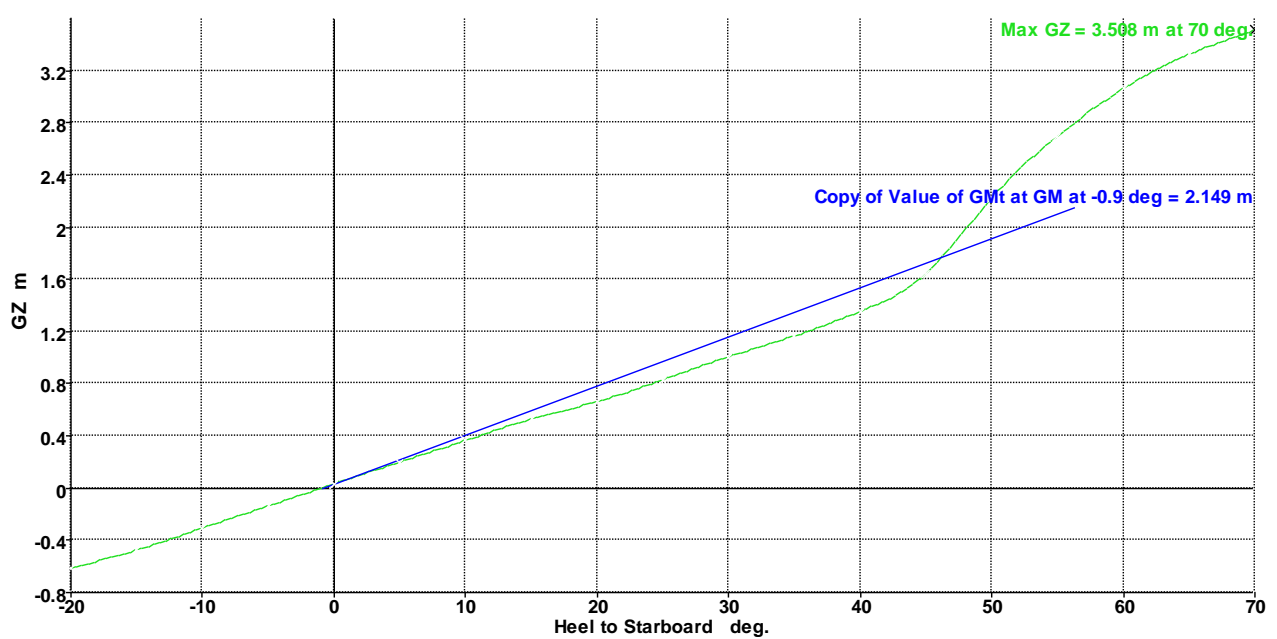


Figura 100, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	3.6	Pass
Escora máxima	15º	0.8º	Pass

Tabla 57, criterio de cumplimiento

c) Calado al puntal con carga

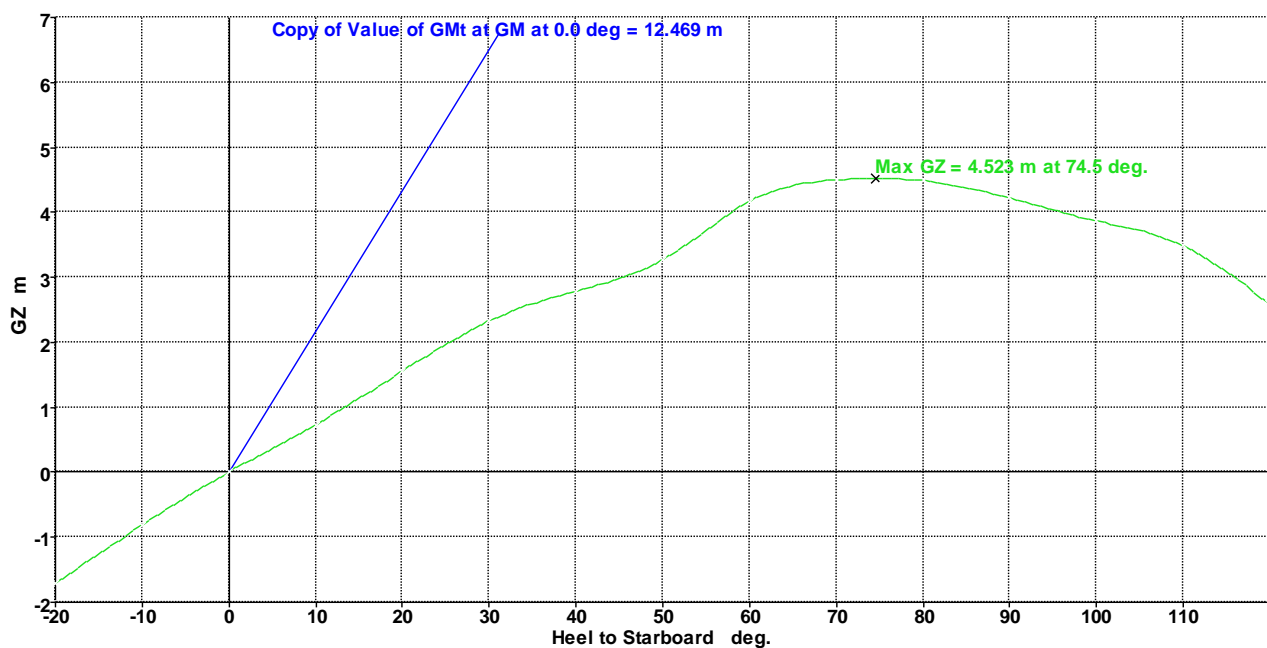


Figura 101, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
<b>Rango Gz positivos</b>	7º	+40º	Pass
<b>Gz mínimo</b>	0.055	4.52	Pass
<b>Escora máxima</b>	15º	10.5º	Pass

Tabla 58, criterio de cumplimiento

d) Calado al puntal con lastre

<b>T</b>	14.409	m
<b>∇</b>	90117	T
<b>Escora</b>	8.7	º
<b>Tpr</b>	14.185	m
<b>Tpp</b>	14.632	m
<b>Tm</b>	14.364	m
<b>Trimado</b>	0.448	m

Tabla 59, datos hidrostáticos

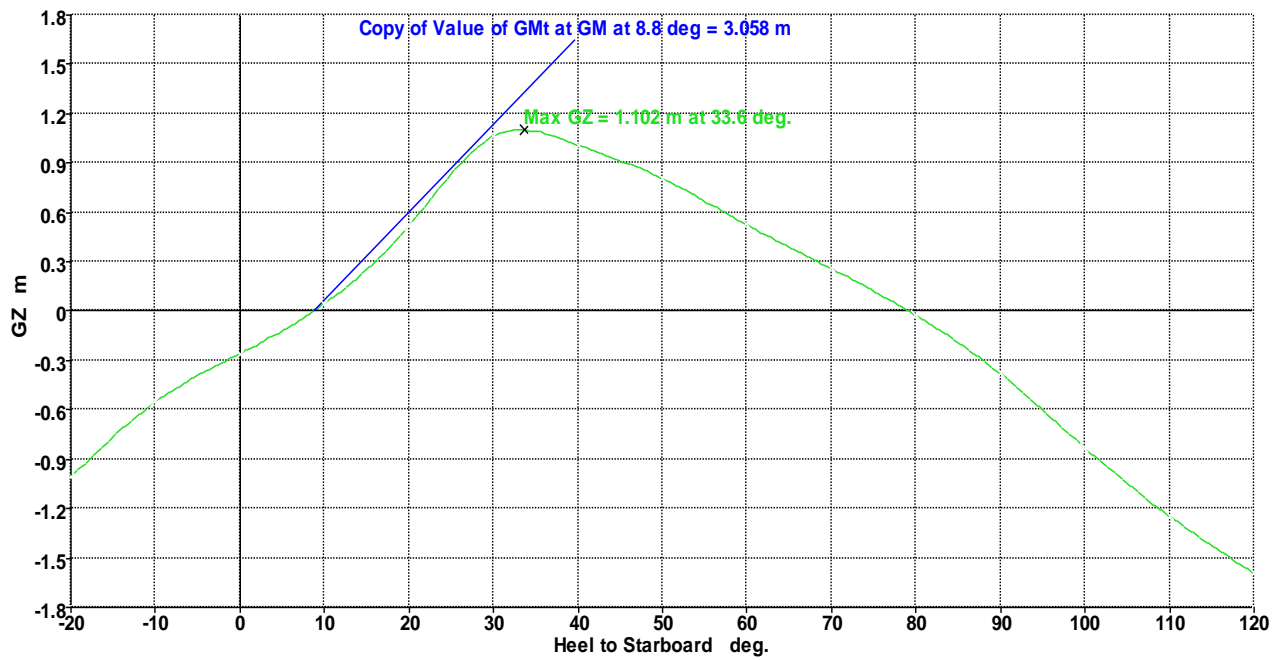


Figura 102, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	1.10	Pass
Escora máxima	15º	8.7º	Pass

Tabla 60, criterios de cumplimiento

### 7.7.2.2 Avería en casing de popa

a) Calado máximo sumergido con lastre

<b>T</b>	24,167	m
<b>∇</b>	102368	t
<b>Escora</b>	11,1	º
<b>Tpr</b>	20,296	m
<b>Tpp</b>	28,037	m
<b>Tm</b>	21,650	m
<b>Trimado</b>	7,740	m

Tabla 61, datos de equilibrio hidrostático obtenido

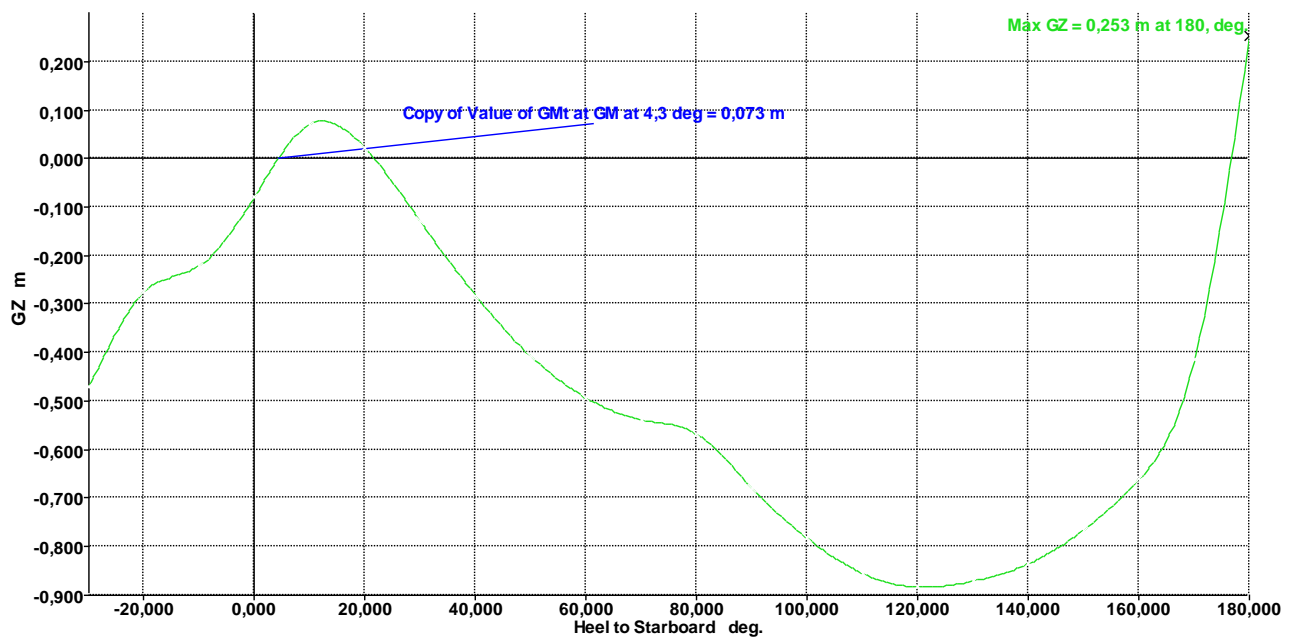


Figura 103, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+20º	Pass
Gz mínimo	0.055	0.07	Pass
Escora máxima	15º	11.1º	Pass

Tabla 62, criterio de cumplimiento

b) Calado máximo sumergido con carga

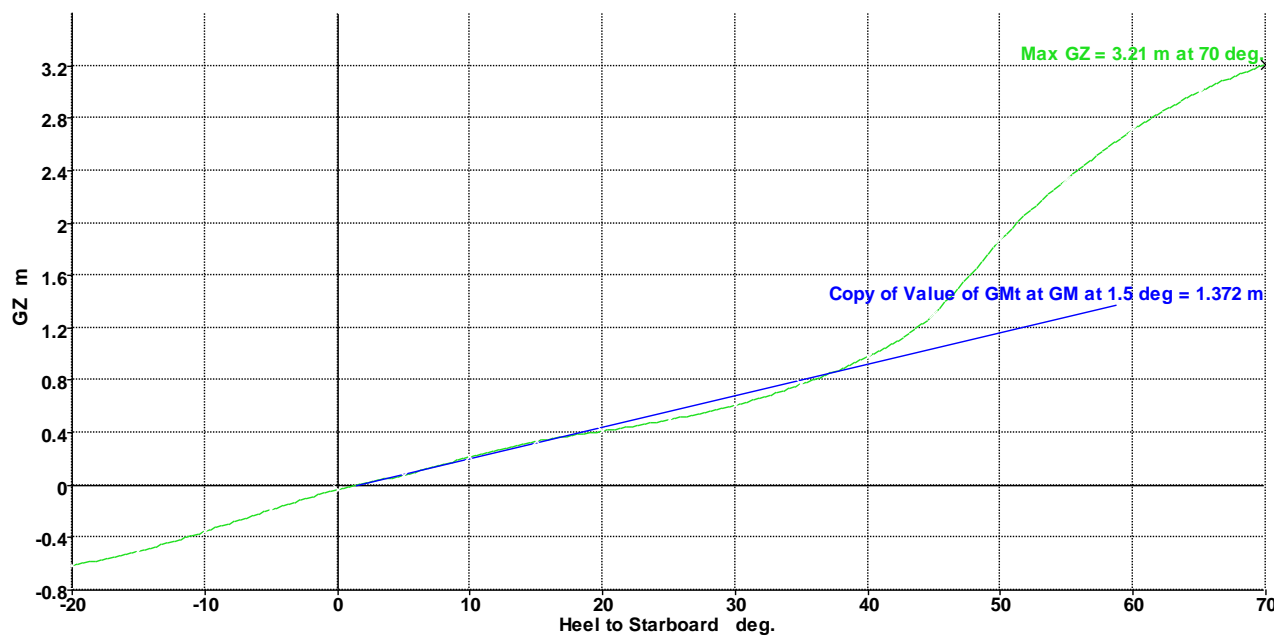


Figura 104, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	3.20	Pass
Escora máxima	15º	1.6º	Pass

Tabla 63, criterio de cumplimiento

c) Calado al puntal lastre

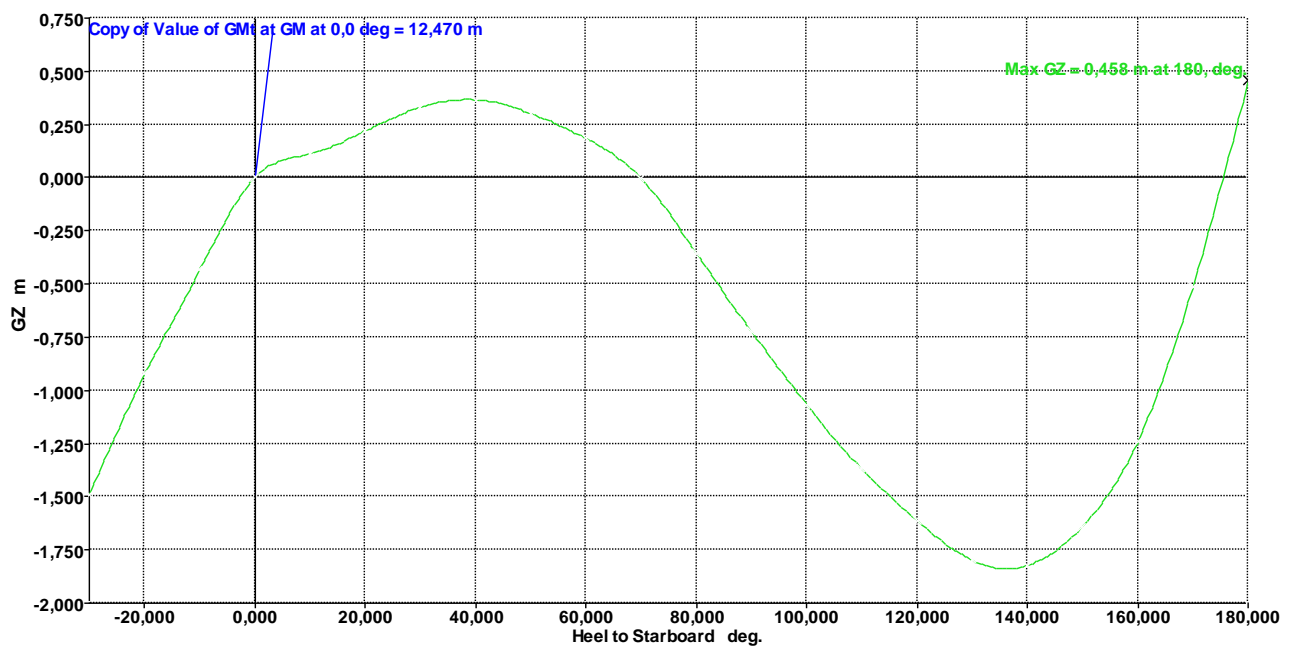


Figura 105, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	0.30	Pass
Escora máxima	15º	12.1º	Pass

Tabla 64, criterio de cumplimiento

d) Calado al puntal con carga

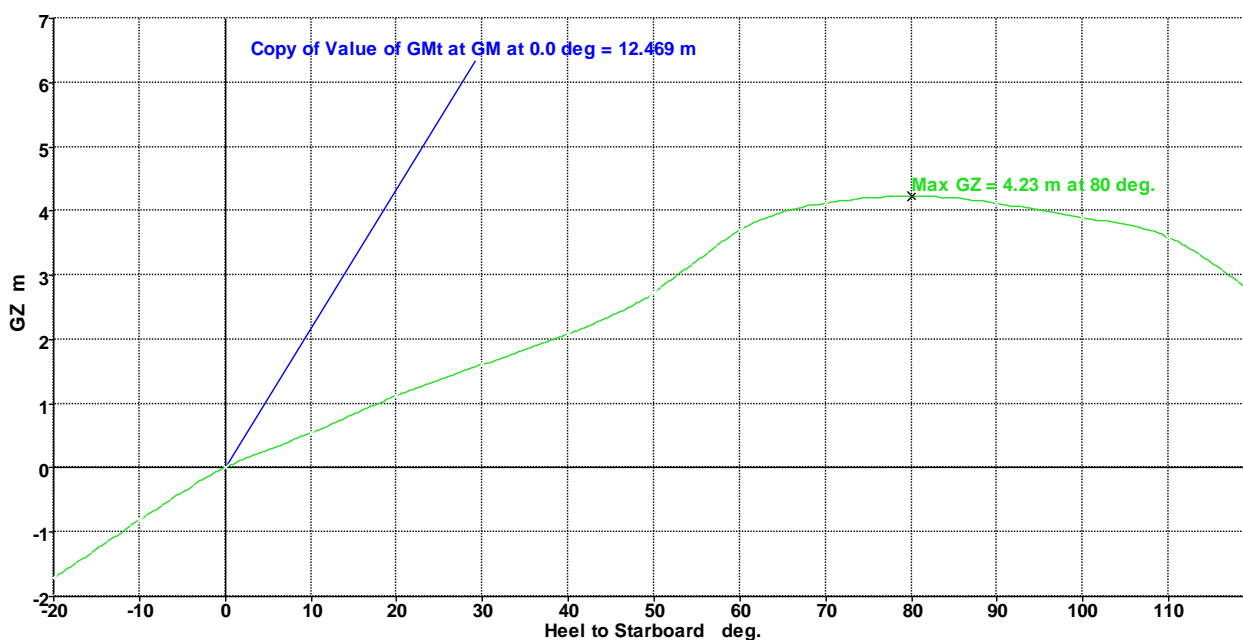


Figura 106, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	4.20	Pass
Escora máxima	15º	9.4º	Pass

Tabla 65, criterio de cumplimiento



### 7.7.2.3 Avería en la sala de máquinas

a) Calado máximo sumergido con carga

<b>T</b>	23.028	m
<b>∇</b>	107796	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Tpr</b>	23.971	m
<b>Tpp</b>	22.084	m
<b>Tm</b>	22.969	m
<b>Trimado</b>	-1.887	m

Tabla 66, datos de equilibrio hidrostático obtenido

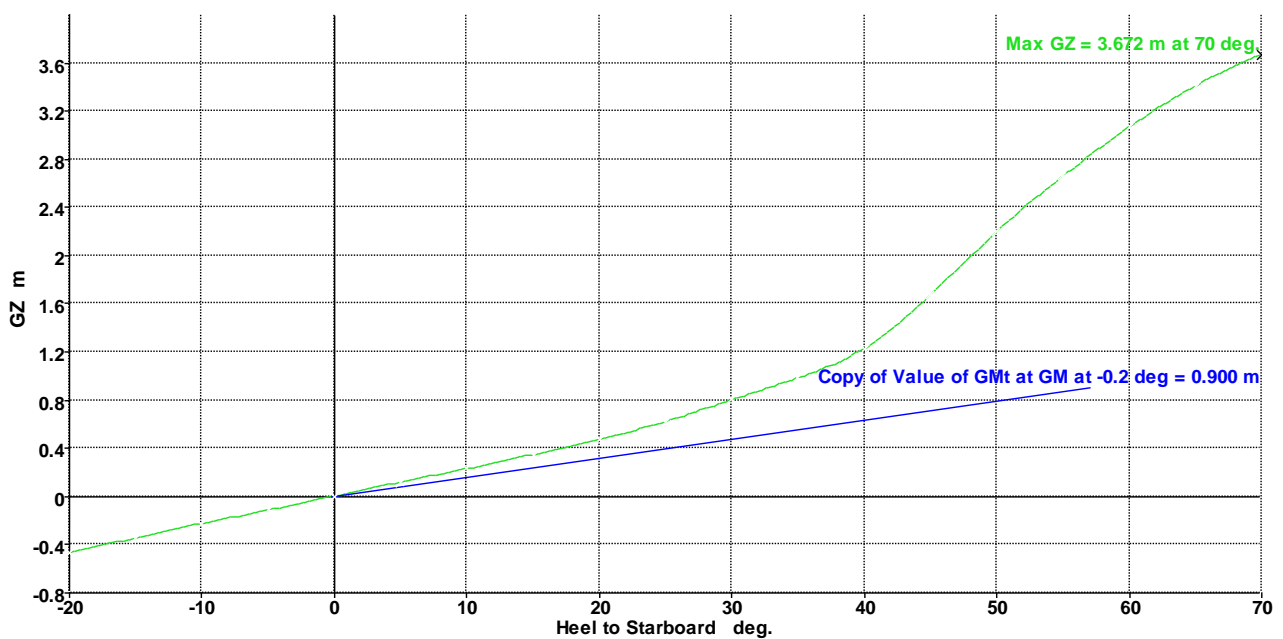


Figura 107, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	3.67	Pass
Escora máxima	15º	0º	Pass

Tabla 67, criterio de cumplimiento

b) Calado máximo sumergido con lastre

Cuando el buque se encuentra al máximo calado de diseño gracias al agua de lastre de los tanques, la inundación de la sala de máquinas provoca el fallo de la estabilidad.

Tras realizar los análisis, el programa *Maxsurf stability* muestra unos valores de trimado negativo superiores al 40º, por lo que la proa estaría completamente sumergida.

Cabe destacar que la sala de máquinas está dotada de un doble costado a lo largo de todas sus superficies, por lo que su inundación no debería suceder.

c) Calado puntal con carga

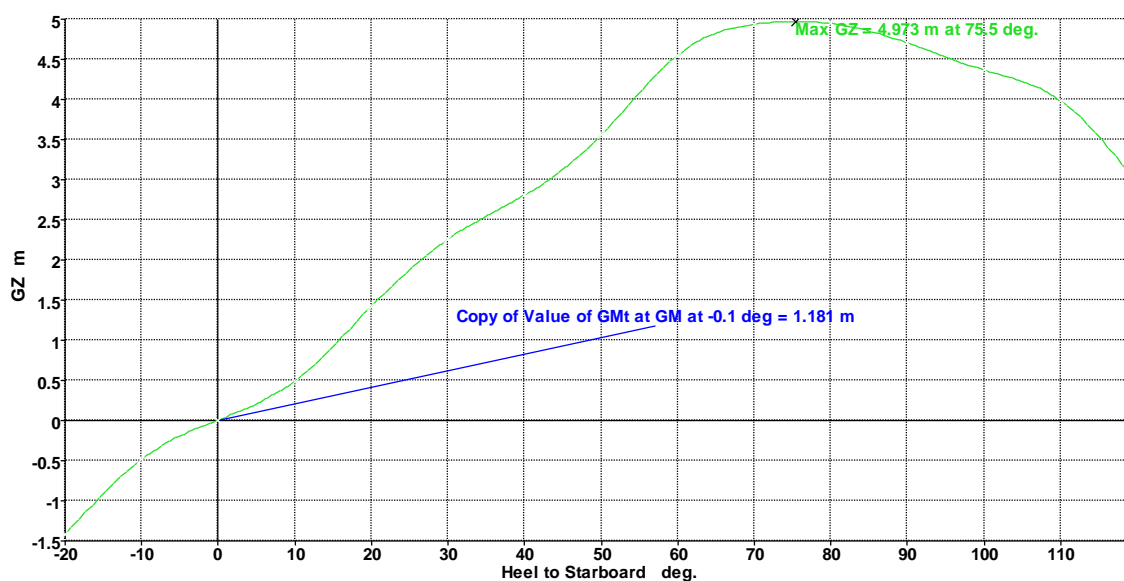


Figura 108, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+40º	Pass
Gz mínimo	0.055	4.9	Pass
Escora máxima	15º	0º	Pass

Tabla 68, criterio de cumplimiento

d) Calado al puntal con lastre

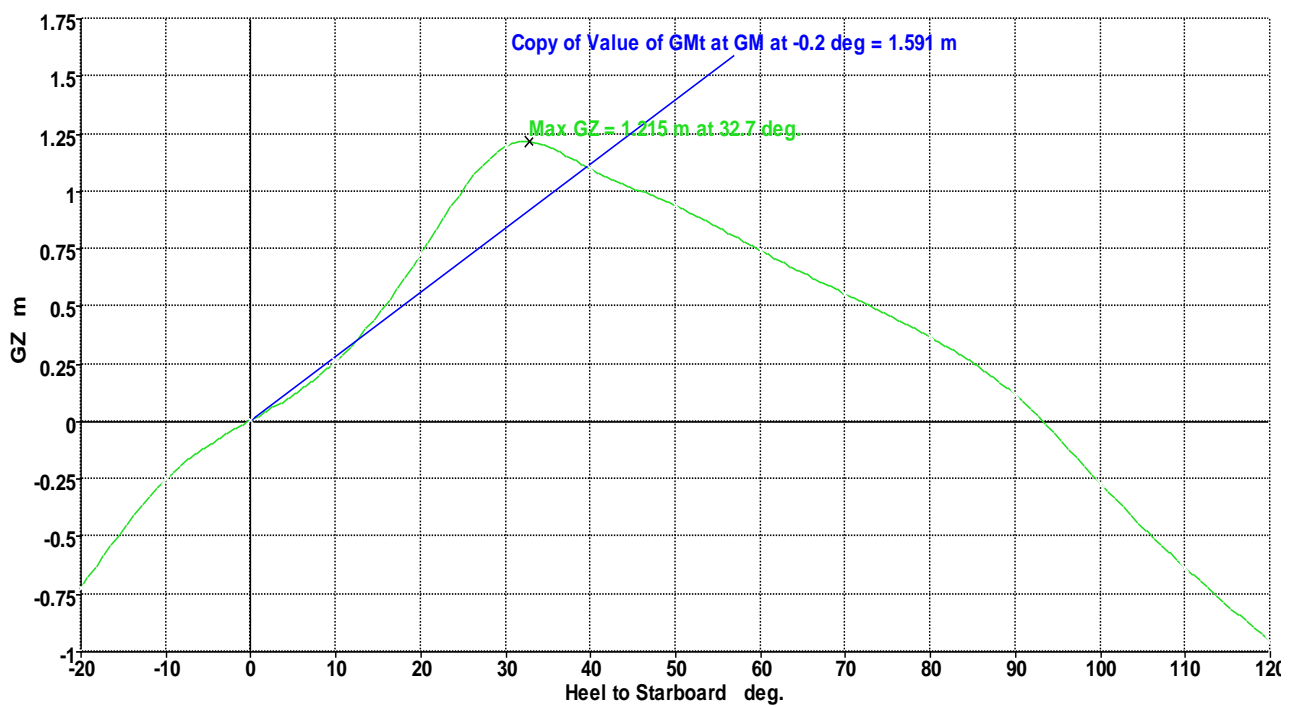


Figura 109, brazo adrizante obtenido

	Valor	Resultado	Criterio
Rango Gz positivos	7º	+80º	Pass
Gz mínimo	0.055	1	Pass
Escora máxima	15º	0º	Pass

Figura 110, criterios de cumplimiento

## 7.8 Discusión de los resultados de estabilidad en avería

La estabilidad en avería se ha analizado en situación probabilista y en determinista.

Los criterios de estabilidad en avería se establecen por cada sociedad de clasificación, y están en constante renovación, debido a que se trata de buques relativamente nuevos y de que la carga cada vez son mayores y más variadas.

La situación probabilista se realiza gracias al propio software usado a lo largo del proyecto, ya que tiene en su base de datos las probabilidades necesarias para hacer los cálculos. El fallo de estabilidad depende, como su nombre indica, de la posibilidad de que uno o más compartimentos se inunden debido a algún fallo o abordaje del buque, se puede sacar algunas conclusiones:

- El análisis realizado ha tomado un máximo de 3 compartimentos adyacentes como máximo número seguido de tanques que pueden llegar a inundarse. Hay que añadir que la división interna del buque casi es su totalidad, está realizada por mamparos estancos, hecho que casi imposibilita la inundación consecutiva de 3 compartimentos.
- Las situaciones más peligrosas serán aquellas en que el Cg de la carga sea excesivamente alto, por lo que el momento generado por una ligera variación de la escora será muy elevado.
- En condiciones de navegación, al llevar o no carga, debido al lastre, conservará siempre unas condiciones de estabilidad suficientes para que la integridad del buque.

Por otro lado, los criterios de estabilidad en avería están definidos por el propio DNV Pt5 Ch10 [58]. La última modificación fue en abril de 2011, y en el mismo apartado a sufrido modificaciones hasta el enero de 2017. Todo esto indica que la propia normativa está en constante modificación y que es flexible. Las conclusiones que se puede sacar de los resultados son las siguientes:

- La situación más crítica es aquella en la que se inunda uno de las *casings* de popa. Dado que la normativa específica que la inundación en sentido vertical es ilimitada, esta condición presenta una escora muy elevada. Durante el proyecto se redefinió las dimensiones de estas reservas de flotabilidad, dado que el tamaño inicial implementado no permitía mantener la estabilidad en situación de vería.
- Hay que tener en cuenta que los *casings* de popa suelen ser desmontables.
- Tanto la inundación de la CM como de parte del castillo de proa no presenta un fallo de estabilidad muy grave y que las condiciones tomadas son de una gravedad muy elevada, a efectos prácticos son casi imposibles de que sucedan.

- Al igual que en los resultados de estabilidad en condiciones transitorias [apartado 6.6], los valores obtenidos no se pueden considerar del todo reales. Esto se debe a que tanto si se considera una carga puntual sobre cubierta, como una carga real, nunca se podrá analizar con 100% de fiabilidad la situación real.

La subdivisión interna del buque proyecto es mucho más frecuente que en otro tipo de buques de la misma clase. Esta subdivisión se ha implementado con la finalidad de cumplir con los requisitos de estabilidad, tanto intacta como en avería, que establecía la OMI y la sociedad de clasificación. Por lo tanto, se puede afirmar que los medios de los que se dispone actualmente no permiten obtener valores de estabilidad positiva, ya que los mismos análisis realizados anteriormente, aplicado a la subdivisión interna de buques de la misma clase, obtenían valores de estabilidad negativos.

## Capítulo 8: Resistencia estructural

En el presente capítulo se pretende dimensionar la estructura del buque tomando como representativa la sección media del buque.<sup>13</sup>

El diseño de la estructura del buque se ha hecho de acuerdo con la sociedad de clasificación DNV GL, Pt 3 Ch 1[63] que hace referencia a la estructura de diseño de buques de más de 100 metros de eslora.

El primer paso consiste en calcular el momento flector máximo al que se podría ver sometido el buque. Para ello comparan los cálculos de momentos obtenido de la normativa con los obtenidos gracias al software de maxsurf stability. Se selecciona el mayor de ambos para garantizar la integridad estructural del buque.

A continuación, se podrá dimensionar los elementos estructurales tales como planchas y refuerzos, con los que, una vez determinados, se obtendrá el módulo resistente de la sección maestra del buque. Que deberá ser mayor que el obtenido de las tensiones máximas calculadas.

La normativa del DNV [63] especifica unos datos estructurales que se usarán en las fórmulas del presente capítulo.

- Eslora de escantillonado, que corresponde al 97% de la eslora de flotación. 180.58 m.
- El coeficiente de olas, obtenido con la fórmula que sigue:

$$C_w = 10.57 * \left( 300 - \frac{L^{\frac{3}{2}}}{100} \right) \quad (90)$$

- El coeficiente de bloque y otros datos del buque que se obtienen del software *maxsurf*.
- Las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  obtendrán el valor de 1.

Dado el tipo de buque de estudio y sus características, se toman valores para dos calados distintos, al máximo sumergido (T=21.84 m) y al de navegación (T=9.19 m).

---

<sup>13</sup> La sección media es aquella que está sometida a mayores esfuerzos, de modo que, si se calcula la estructura en esa zona, y suponiendo que el buque se comporta como una viga, se puede suponer que todos los elementos estructurales a lo largo de la eslora serán similares.

<b>T</b>	<b>9.19</b>	<b>21.84</b>	<b>m</b>
<b>Lfl</b>	188.5	187.13	m
<b>Lf</b>	181.9025	180.58045	m
<b>Cb</b>	0.768	0.555	
<b>Cw</b>	9.4666	9.44444	
<b>V</b>	60334.09	104353	T
<b>p</b>	1.025	1.025	t/m3
<b>B</b>	44.88	44.88	m
<b>P</b>	12.51	12.51	m

**Tabla 69, datos representativos en ambos calados**

Finalmente, en el anexo 7 se puede observar un diseño de cuaderna maestra realizada con AutoCAD.

## 8.1 Tipo de estructura

Dada su gran eslora, la estructura será longitudinal, es decir, los elementos de refuerzo secundario serán exclusivamente longitudinales, mientras que los primarios serán tanto longitudinales como transversales.

Además de los refuerzos que se añadirán, la tipología de este buque requiere una gran subdivisión interior entre mamparos y cubiertas estancas, que dan mayor valor de resistencia que si se tratase de una única zona de carga.

La zona del buque proyecto que se diseñará es la sección maestra. Para ello se ha tomado la cuaderna 154 a 96.71 m desde el espejo de popa.



## 8.2 Material

Según la normativa aplicada, para buques de carga general, el acero mínimo requerido es el NV-NS, con un límite elástico de 235 N/mm<sup>2</sup> y un factor  $f_1$  de unidad.

Es además el tipo de acero con el que se construyen la gran mayoría de buques cargueros.

Además, se tomará un valor de incremento del espesor de las planchas debido a los efectos de la corrosión.

$$T_k = 1.5 \text{ mm}$$

## 8.3 Disposición de elementos estructurales

Como ya se ha comentado en el capítulo 4, la disposición de los elementos estructurales viene dado por la normativa del DNV Pt3 Ch1[63] i Pt3 ch2 [31].

- Transversales

Cuadernas: 600 mm

Bulárcamas cada 4 cuadernas: 2400 mm

- Longitudinales

Longitudinales irán separados en función de la zona del buque<sup>14</sup>

Vagras cada 5000 mm

---

<sup>14</sup> Más adelante se explicará con más detalle la separación entre longitudinales en cada una de la zona de los buques.

## 8.4 Momentos flectores

Según el DNV Pt3 Ch1 [63], los momentos flectores verticales se calculan en aguas tranquilas, en aguas con oleaje y en condiciones de arrufo y quebranto.

Dado el perfil operativo del buque se calcularán los momentos flectores y los esfuerzos cortantes para dos calados. Uno representativo en situación de navegación a 9.19 m desde la línea base. El otro representativo de la situación de carga/descarga al calado máximo de 21.84 m de la línea base.

Para el cálculo de la estructura se tomará el valor máximo calculado.

### 8.4.1 Momentos flectores en aguas tranquilas

El momento flector en aguas tranquilas, tanto en condición de arrufo como en quebranto, no será nunca inferior a:

$$M_S = K_{sm} * M_{so} \quad (91)$$

Dónde:

- $K_{wm}$ : tomará el valor de 1 dentro del 0.4\*LOA centrado en la sección media.

Los momentos debido a arrufo y quebranto respectivamente se obtienen de las expresiones que siguen:

$$M_{so} = -0.065 * C_w * L^2 * B(C_b + 0.7) \quad (92)$$

$$M_{so} = C_w * L^2 * B(0.1225 - 0.015C_b) \quad (93)$$

### 8.4.2 Momentos flectores en aguas con olas

El momento flector en aguas con olas, tanto en condición de arrufo como en quebranto no será nunca inferior a:

$$M_W = K_{wm} * M_{wo} \quad (94)$$

Dónde:

- $K_{wm}$ : toma el valor de 1 para las secciones centradas en 0.4\*LOA centrado en la sección media.
- 

Los momentos debido a arrufo y quebranto respectivamente se obtienen de las expresiones que siguen:

$$M_{wo} = -0.11C_w * \alpha * L^2 * B * (0.7 + C_b) \quad (95)$$

$$M_{wo} = 0.19C_w * \alpha * L^2 * B * C_b \quad (96)$$

Dónde:

- $C_b$ : El valor del coeficiente de bloque nunca se tomará inferior a 0.6.
- $\alpha$ : se tomará un valor de la unidad, como se ha comentado anteriormente. Se trata de un factor que depende de si el buque está en navegación o en aguas abrigadas.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Para aguas abrigadas tomaría un valor de 0.5, pero dado que nos interesa obtener el momento máximo se considera la condición más crítica, es decir, en navegación.

Con los valores calculados se puede obtener el total para cada uno de los calados analizados.

		Aguas tranquilas	Aguas con olas	Total(KN*m)
<b>9.19 m</b>	Arrufo	-1341416.845	-2270090.046	-3611506.891
	Quebranto	1560159.731	2051347.161	3611506.891
<b>21.84 m</b>	Arrufo	-1127594.609	-1976659.873	-3104254.482
	Quebranto	1578217.769	1575798.78	3154016.549

**Tabla 70, resultados de momentos flectores**

## 8.5 Cortantes

Del mismo modo que con los momentos flectores, los esfuerzos cortantes se analizan para los dos calados representativos, en condición de arrufo y quebranto y para aguas tranquilas o con olas.

### 8.5.1 Cortantes en aguas tranquilas

Los cortantes en aguas tranquilas, tanto en arrufo y quebranto, nunca serán inferiores a:

$$Q_s = K_{sq} * Q_{SO} \quad (97)$$

$$Q_{SO} = 5 * \left( \frac{M_{SO}}{L} \right) \quad (98)$$

Dónde:

- $K_{sq}$ : 0.8 centrado en 0.4\*LOA.
- $M_{SO}$ : son los momentos flectores obtenidos anteriormente.

### 8.5.2 Cortantes en aguas con olas

Los cortantes en aguas con olas, tanto en arrufo y quebranto, nunca serán inferiores a:

$$Q_{wp} = 0.3 * \beta * K_{wqp} * Cw * L * (Cb + 0.7) \quad (99)$$

$$Q_{wp} = -0.3 * \beta * K_{wqn} * Cw * L * (Cb + 0.7) \quad (100)$$

Dónde:

- $K_{wqp}$  y  $K_{wqn}$  : toman un valor de 0.7 para secciones centradas en  $0.7*LOA$ .
- $\beta$ :1 en aguas abiertas.

Con los valores obtenidos se puede obtener el total para los dos calados analizados.

		AGUAS TRANQUILAS	AGUAS CON OLAS	TOTAL(KN)
<b>9.19 m</b>	Arrufo	-29497.49113	23824.8967	-5672.59445
	Quebranto	34307.60392	-23824.8967	10482.7072
<b>21.84 m</b>	Arrufo	-21854.97451	20173.8226	-1681.15189
	Quebranto	30588.92694	-20173.8226	10415.1043

**Tabla 71, resultados de cortantes**

## 8.6 Momentos y cortantes analizados con Maxsurf

Se calcula también los momentos flectores y esfuerzos cortantes máximos a partir de software *maxsurf stability*. Para ello se recurre al análisis “*longitudinal strenght*”, que nos permite obtener los momentos flectores y los cortantes en función del reparto de pesos a lo largo del buque.

Se reparte el peso de la carga de cubierta y de los demás pesos del buque a lo largo de la eslora de la siguiente manera:

Elemento	Peso(t)	Xo(m)	Xg(m)	Zf(m)
<b>Carga en cubierta</b>	30000.000	85.000	57.500	112.500
<b>MMPP</b>	50.000	138.170	138.170	138.170
<b>MMPP</b>	50.000	138.170	138.170	138.170
<b>MMPP</b>	50.000	138.170	138.170	138.170
<b>MMPP</b>	50.000	138.170	138.170	138.170
<b>MMAA</b>	14.000	147.720	147.720	147.720
<b>MMAA</b>	14.000	147.720	147.720	147.720
<b>Azipod</b>	141.440	7.250	7.250	7.250
<b>Azipod</b>	141.440	7.250	7.250	7.250
<b>hélice de proa</b>	12.250	172.000	172.000	172.000
<b>hélice de proa</b>	12.250	175.000	175.000	175.000
<b>bomba 1</b>	0.820	136.620	136.620	136.620
<b>bomba 2</b>	0.475	140.200	140.200	140.200
<b>bomba 3</b>	0.820	136.620	126.620	151.620
<b>bomba 4</b>	0.475	140.000	118.000	155.000
<b>tripulación</b>	3.125	162.000	152.000	172.000
<b>Castillo</b>	2581.000	172.000	169.560	174.440
<b>superestructura</b>	687.600	167.000	162.120	171.880

<b>acero continuo</b>	537.800	2.440	-2.440	7.320
<b>acero continuo</b>	553.940	9.760	4.880	14.640
<b>acero continuo</b>	569.980	19.520	14.680	24.440
<b>acero continuo</b>	585.670	29.280	24.400	34.160
<b>acero continuo</b>	601.370	39.000	34.180	43.940
<b>acero continuo</b>	613.930	48.800	43.920	53.680
<b>acero continuo</b>	623.300	58.500	53.700	63.460
<b>acero continuo</b>	623.300	68.320	63.440	73.200
<b>acero continuo</b>	623.300	78.000	73.120	82.880
<b>acero continuo</b>	623.300	87.840	82.960	92.720
<b>acero continuo</b>	623.300	97.600	92.720	102.480
<b>acero continuo</b>	623.300	107.360	102.560	112.320
<b>acero continuo</b>	623.300	117.120	112.240	122.000
<b>acero continuo</b>	623.300	126.800	121.920	131.680
<b>acero continuo</b>	623.300	136.640	131.760	141.520
<b>acero continuo</b>	623.300	146.400	141.520	151.280
<b>acero continuo</b>	603.300	156.160	151.280	161.040
<b>acero continuo</b>	534.220	165.920	161.080	170.840
<b>acero continuo</b>	384.270	175.680	175.680	175.680
<b>acero continuo</b>	154.730	185.400	185.400	185.400
<b>acero continuo</b>	0.000	195.000	195.000	195.000
<b>Casing popa</b>	334.000	16.500	16.500	16.500
<b>Casing popa</b>	334.000	16.500	16.500	16.500
<b>Peso CM Repartido</b>	767.900	146.520	131.000	161.000
<b>Peso equipos proa</b>	2494.000	174.000	150.000	190.000
<b>Peso equipos popa</b>	959.300	12.500	0.000	25.000
<b>Peso equipos cubierta</b>	575.550	76.500	25.000	140.000

Tabla 72, pesos repartidos

Con los nuevos datos de carga repartida se puede poner en marcha el análisis. Para ello se ha escogido aquella situación de carga más crítica, que es en la que se navega con mayor peso en cubierta.

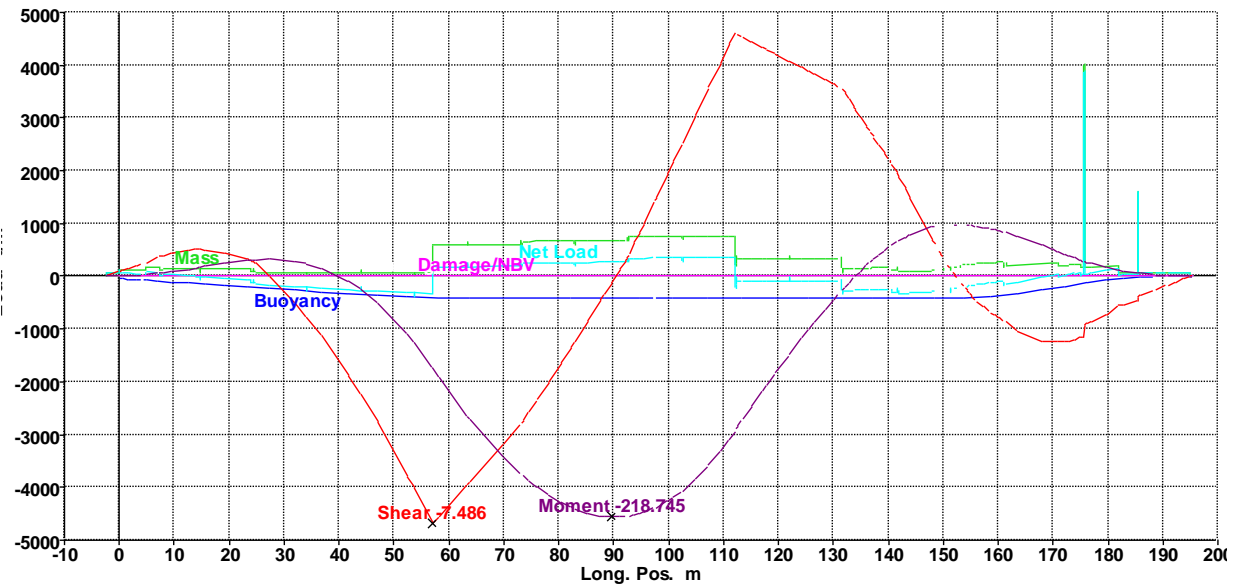


Figura 111, momentos flectores y cortantes resultantes



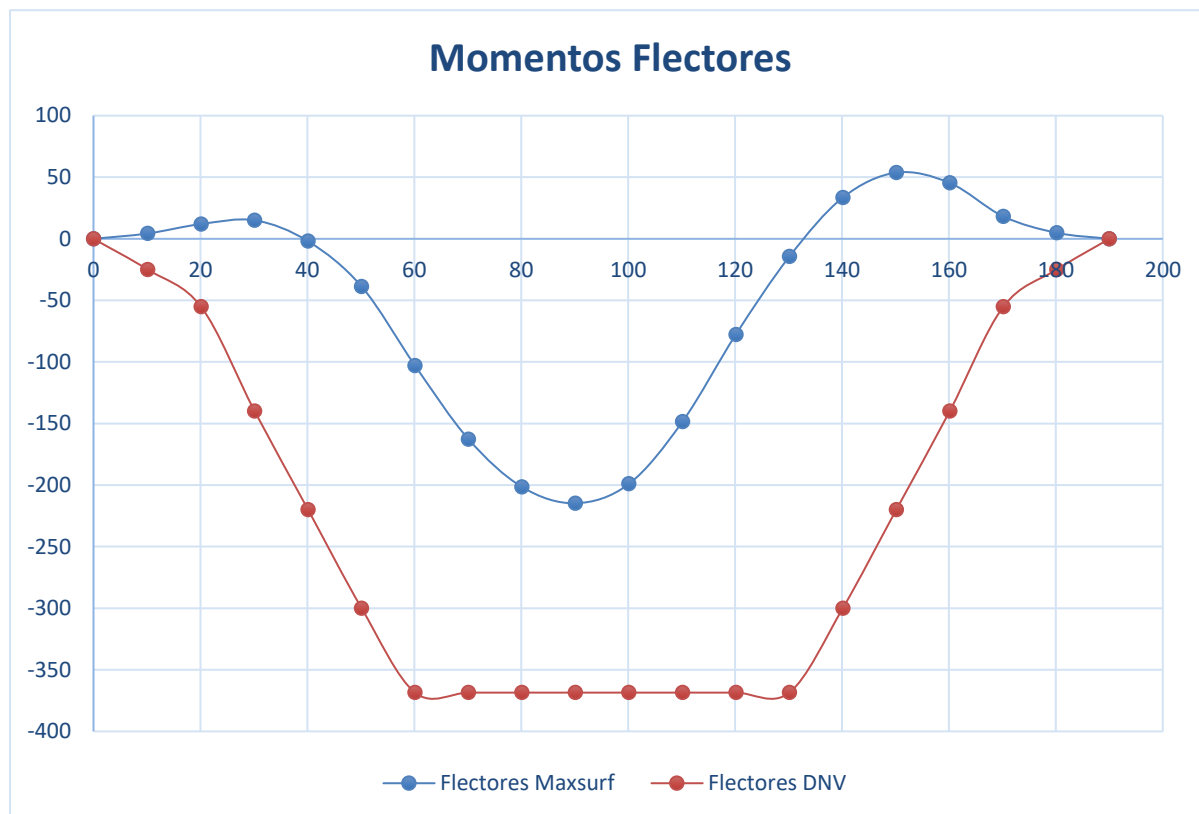
Sección	X(m)	W (t/m)	Flotabilidad(t/m)	Carga neta (t/m)	Cortante (t <sup>3</sup> )	Momentos (T <sup>3</sup> *m)
0	10.140	95.128	-111.248	-16.120	0.725	4.329
1	20.140	96.601	-179.121	-82.520	0.899	12.014
2	30.147	66.438	-247.043	-180.605	-0.430	15.017
3	50.147	68.789	-367.580	-298.791	-5.297	-38.745
4	60.147	587.575	-404.351	183.224	-6.848	-103.004
5	70.147	599.130	-408.859	190.272	-4.986	-162.764
6	80.147	668.599	-409.730	258.869	-2.627	-201.514
7	90.147	679.410	-410.334	269.076	0.007	-214.717
8	100.147	759.281	-410.603	348.679	3.278	-199.027
9	110.147	768.190	-410.662	357.527	6.818	-148.564
10	120.147	324.193	-410.473	-86.280	6.743	-77.672
11	130.147	323.792	-410.173	-86.380	5.884	-14.479
12	140.147	131.967	-409.752	-277.785	3.599	33.477
13	150.147	119.963	-408.842	-288.879	0.458	53.727
14	160.147	173.256	-365.608	-192.352	-1.961	45.394
15	170.147	715.707	-226.737	488.969	-2.927	18.209
16	180.147	81.330	-67.766	13.565	-0.834	4.855

**Tabla 73, valores de esfuerzos obtenidos**

El momento máximo se da en la sección maestra del buque, a los 90 metros del espejo de popa, con un valor de  $214.76 \times 10^3 \text{ t}\cdot\text{m}$

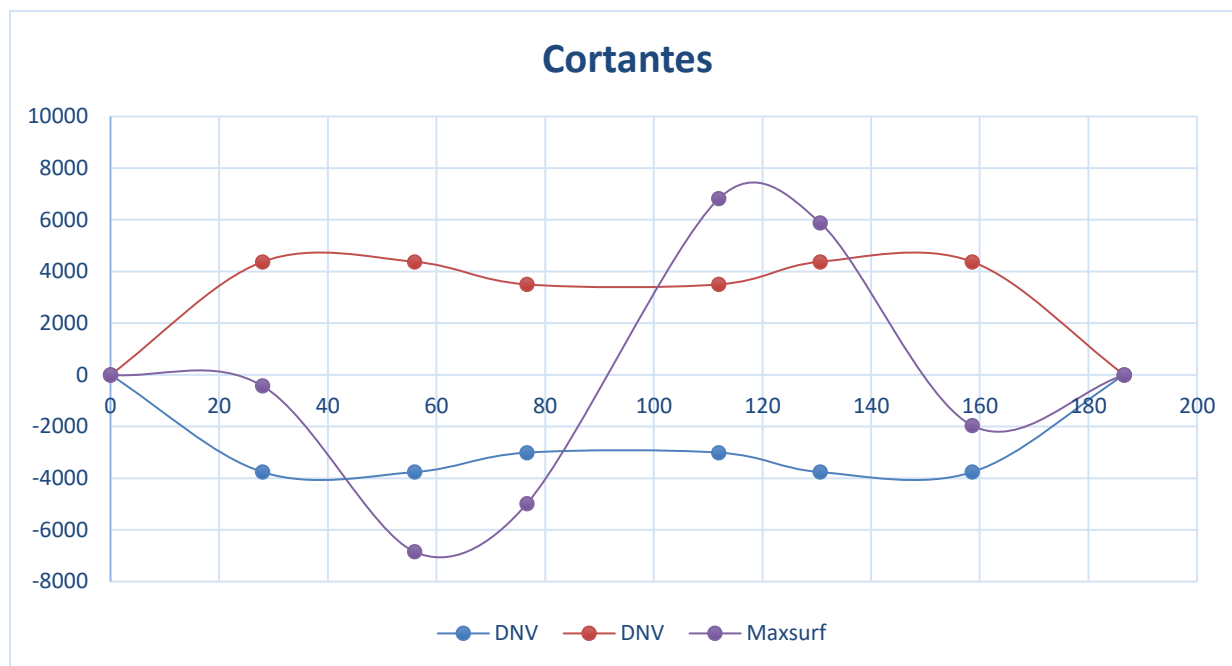
El cortante máximo se da a los 57 metros del espejo de popa con un valor de 7486 t. Hay que tener en cuenta que a 112 m del espejo de popa hay otro cortante muy elevado. Estos dos puntos coinciden con el inicio y el final de la disposición de la carga transportada en cubierta.

A continuación, se muestra una gráfica con los momentos flectores obtenidos por los dos métodos. Uno mediante el cálculo establecido por DNV Pt3 Ch1 [63] y otro por los análisis realizados con *Maxsurf Stability*.



De dicha comparación se deriva que, al dimensionar la estructura con las tensiones y momentos obtenidos mediante el cálculo de normativa, esta será lo suficientemente resistente como para resistir los esfuerzos a los que pudiera estar sometido el buque en su operación habitual.

Por otro lado, la gráfica que compara los momentos cortantes según los dos métodos de estudio es la que sigue:



En este caso los cortantes obtenidos en el software son mucho mayores que los obtenidos por el método de la normativa. Se trata de un caso evidente, dado que las situaciones analizadas en el software *Maxsurf* han puesto al límite las capacidades del buque.

Se toma el mayor como aquel más representativo para la estructura del buque.

## 8.7 Presiones de diseño

El DNV Pt3 Ch1 [63], proporciona una serie de expresiones para calcular las presiones a las que teóricamente será sometido el buque. A partir de los cálculos realizados a continuación, se podrá hacer una estimación del escantillonado, tanto de las planchas como de los refuerzos.

Recordemos que hasta ahora se ha analizado la resistencia estructural a dos calados distintos, por lo que se seguirá haciendo lo propio en los cálculos que siguen.

La presión tomada finalmente para el posterior será aquella que sea mayor.

### 8.7.1 Presión en el fondo

La presión en el fondo vendrá dada por la suma entre la presión exterior y la interior.

La presión externa que toma mayor valor es la producida por la columna de agua al máximo calado de inmersión.

$$Pf = 10 * ho + P_{dp} \quad (101)$$

Dónde:

- $ho$ : 21.84 m, correspondiente a la altura de la columna de agua.

$$P_{dp} = P_l + \left(135 * \frac{y}{B+75}\right) - (1.2 * (T - z)) \left(\frac{KN}{m^2}\right) \quad (102)$$

Dónde:

- $Y$ : 22.44 m
- $Z$ : Distancia desde la línea base hasta el punto de aplicación de la fuerza, por tanto, se toma el valor de 0.
- $B$ : 44.88 m

$$P_l = K_s * C_w + K_f \quad (103)$$

Dónde:

- $K_s$ : 2 para secciones centradas entre 0.2L y 0.7L.

$$K_f = 0.8 * C_w \quad (104)$$

Dónde:

$$C_w = 10.57 * \left( 300 - \frac{L}{100} \right)^{\frac{3}{2}} = 9.44 \quad (105)$$

Aplicando la formula inicial, la presión del fondo es la siguiente:

$$Pf = 244.90 \frac{KN}{m^2} \quad (106)$$

La presión interna se toma la menor de las calculadas, de modo que se sobredimensionará ligeramente la fuerza aplicada.

$$Pf' = h_s * (10 + 0.5a_v) \quad (107)$$

Dónde:

- $h_s$ : es la distancia vertical desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el tope del tanque de lastre, toma el valor de 3 metros.
- $Av$  es la aceleración vertical en  $\frac{m}{s^2}$  que se calcula de la siguiente manera:

$$a_v = \frac{Kv * g * a_0}{CB} \quad (108)$$

$$a_0 = \frac{3Cw}{L} + (Cv * Cvi)$$

Dónde:

- $Kv$ : 0.7
- $G$ : 9.8 m/s<sup>2</sup>
- $Cb$ : coeficiente de bloque a máximo calado, 0.55.

- Cw: Como en el apartado anterior

$$C_v = \frac{\sqrt{L}}{50} \quad (109)$$

$$C_{vi} = \frac{V}{\sqrt{L}} \quad (110)$$

Dónde:

- V: velocidad del buque, 13 Kn.
- L: Eslora del buque

La presión interna mínima calculada se resta a la máxima externa obtenida, así se conoce la presión total a la que está sometido el fondo en la situación más crítica.

$$P'_f = 37.72 \frac{KN}{m^2}$$

$$P_{fT} = 282.62 \frac{Kn}{m^2} \quad (111)$$

### 8.7.2 Presión en el doble fondo

La presión máxima en el doble fondo viene dada por los tanques de lastre centrales, que son los más altos dentro de la estructura del buque.

$$P_{df} = 10 * h_s + p_0 \quad (112)$$

Dónde:

- P0: 25
- Hs= 7m

$$P_{df} = \frac{95.1Kn}{m^2}$$

### 8.7.3 Presión en los costados

La presión total en los costados, al igual que en el fondo, se obtiene sumar la presión interna a la externa.

El calado que se ha tomado para el cálculo de las presiones es el de máxima inmersión, ya que es el que, de nuevo, representa la situación de tensión más elevada para las planchas de costado.

La presión exterior viene dada por la presión de la columna de agua.

$$P_c = 10 * h_o + P_{dp} \quad (113)$$

Dónde:

- $H_o$ : altura de la columna de agua hasta el centro del tanque, 18.84 m.
- $P_{dp}$ : usando la misma expresión anterior, 48.11.

$$P_c = 236.51 \text{ KN/m}^2$$

La presión interior se calcula con la siguiente expresión:

$$h_o = (\rho * g * h_s) + p_o - (10 * h_b) \quad (114)$$

Dónde:

- $H_b$ : altura de la línea de flotación al punto de aplicación de la fuerza 2.7 m.
- $H_s$ : altura desde el tope del tanque al centro de aplicación de la fuerza, 3.5 m.
- $P_o$ : 25

- $\rho$ : 1.025 T/m<sup>3</sup>
- $G$ : 9.8 m/s<sup>2</sup>

$$P_{c'} = 33.15 \frac{Kn}{m^2} \quad (115)$$

La presión total ejercida en los costados de la embarcación es por tanto la diferencia entre las dos anteriormente calculadas.

$$P_{cT} = 269.51 \frac{KN}{m^2} \quad (116)$$

#### 8.7.4 Presión en las cubiertas

En el caso de la cubierta también se analizan las dos situaciones de calados representativos. Con un calado máximo de inmersión, la cubierta estará sometida a la presión hidrostática, pero en este caso será menor que la fuerza ejercida por la carga.

Para el cálculo de la presión se usa el valor  $q$ , obtenido de la base de datos, que es un valor de t/m<sup>2</sup> con el que se diseñan las cubiertas a la intemperie supuestas para llevar carga.

Para el buque de estudio, la carga de diseño ( $q$ ) toma un valor de 25 t/m<sup>2</sup>.

$$P_{cu} = (g_0 + 0.5A_v) * q \quad (117)$$

Dónde:

- $G_0$ : 9.8 m/s<sup>2</sup>

$$a_v = \frac{K_v * g * a_0}{CB} \quad (118)$$



$$a_0 = \frac{3Cw}{L} + (Cv * Cvi) \quad (119)$$

Dónde:

- Kv:0.7
- L:181.9 m
- Cw:9.46
- Cv:0.269
- Cvi:0.9638

$$P_{cu} = 291.83 \frac{KN}{m^2}$$

Para el resto de las cubiertas que no son a la intemperie, la presión viene definida por los tanques de lastre que las delimitan. Tomando el valor máximo de la expresión siguiente:

$$P_{cu'} = h_s * g * \rho + p_o \quad (120)$$

Dónde:

- P0:25 en general
- G:9.8 m/s<sup>2</sup>
- Hs= 7m
- $\rho$ : 1,025 T/m<sup>3</sup>

$$P_{cu'} = 95.31 \frac{KN}{m^2}$$

### 8.7.5 Presión en los mamparos

La presión en los mamparos será aquella máxima que desarrolle debido a los tanques de lastre mayores.

$$P_m = h_s * g * \rho + p_o \quad (121)$$

$$P_m = 60.15 \text{ KN/m}^2$$

## 8.8 Escantillado de las planchas

En el cálculo del escantillado se incluyen tanto las planchas de fondo, doble fondo, costados, cubierta y mamparos, como los refuerzos primarios y secundarios que van unidos a cada una de las planchas. Finalmente, obtenidos todos los datos se podrá proponer un diseño de cuaderna maestra y comprobar si el módulo resistente obtenido es superior al requerido por los momentos flectores.

Para el cálculo de módulos de inercia de los refuerzos, el DNV Pt 3 Ch1 [63] proporciona dos parámetros de separación que se definen a continuación:

L: es la distancia entre los elementos de refuerzo primario donde se apoyan los secundarios, se tomará un valor de 2.4 m.

S: separación entre refuerzos, toma un valor de 0.5 en los costados, 0.5 en las cubierta y fondo, 0.75 en las vagras y baos, 0.625 en doble fondo y 2ª cubierta y 0.875 en mamparos.

### 8.8.1 Fondo

A la quilla se le da más espesor, y la anchura que ocupa en el fondo viene definida por la siguiente expresión.

$$B = 800 + 5L \quad (122)$$

$$B = 1709.5 \text{ mm}$$

Se tomará un valor de 2 m.

El espesor mínimo de la quilla será:

$$t = 7 + \frac{0.05L}{\sqrt{f_1}} + t_k \quad (123)$$

Dónde:

- $t_k$ : es un incremento por espesor de 1.5 mm
- $f_1$ : toma el valor de la unidad para el acero NV-NS.

$$t = 17.59 \text{ mm}$$

El valor obtenido será siempre mayor que el escantillonado definido para el resto del doble fondo y del pantoque.

$$t = 5 + \frac{0.04L}{\sqrt{f_1}} + t_k \quad (124)$$

$$t = 13.77 \text{ mm}$$

El espesor del doble fondo viene dado por:

$$t = t_o + \frac{0.03L}{\sqrt{f_1}} + t_k \quad (125)$$

Dónde:

- $t_o = 5$  en espacios de tanques.

$$t = 11.95 \text{ mm}$$

Los refuerzos primarios de fondo están compuestos por estructuras longitudinales y transversales. Estas se conocen como vagras y varengas, respectivamente. El espesor mínimo de estas planchas, que ocupan todo el espacio desde la base hasta el tope del doble fondo viene dado por la siguiente fórmula.

$$t = 6 + \frac{K}{\sqrt{f_1}} + t_k \quad (126)$$

Dónde:

- $K=0.04$  cuando se extienden a más de 2 m desde las planchas de fondo.

$$t = 14.77 \text{ mm}$$

Los refuerzos secundarios longitudinales de fondo deberán tener un módulo resistente mínimo de:

$$Z = \frac{83 \cdot l^2 \cdot S \cdot p \cdot Wk}{\sigma} \quad (127)$$

Dónde:

- $L: 2.4$
- $S: 0.5$
- $P$ : Presión de diseño 282.62.
- $\sigma = 160 \cdot f_1$

$$Wk = 1 + 0.05(Tkw + Tkf) \quad (128)$$

Dónde:

- $T_{kw}$  y  $T_{kf}$  son valores de aumento por corrosión en los perfiles usados como refuerzos. Por lo tanto, toman un valor de 1.5 mm cada uno de ellos.

$$Z = 485.56 \text{ cm}^3$$

Para el cálculo del módulo resistente de los refuerzos del doble fondo se usa la misma expresión, aplicando la presión del doble fondo.

$$Z = 163.39 \text{ cm}^3$$

Los refuerzos secundarios colocados en las varengas y vagras deberán tener un módulo resistente mínimo de:

$$Z = \frac{100 \cdot l^2 \cdot S \cdot p \cdot w_k}{\sigma} \quad (129)$$

Dónde:

- $S$ : 0.75
- $L$ : 2.4 m
- $W_k$ : 1.15
- $P$ : Presión ejercida por los tanques de lastre de doble fondo, que viene dada por la expresión que sigue:

$$P = h_s \cdot 10 + P_o \quad (130)$$

$$Z = 204.23 \text{ cm}^3$$

### 8.8.2 Costado

El espesor de las planchas de costado no será nunca menor, en ninguna parte del buque, a la expresión que sigue:

$$t = 5 + \frac{K*L1}{\sqrt{f1}} + t_k \quad (131)$$

La constante K, representa las estructuras de costado hasta 4.6 m de la línea de flotación de verano, a partir de este punto cada 2 metros el valor se reduce en 0.01. Se toma, por tanto, el máximo valor, siendo este K=0.04.

$$t = 13.77 \text{ mm}$$

El espesor de la traca de cinta se obtiene de la media entre los escantillonado de cubierta y de costado, pero dado que el valor es inferior al mínimo requerido para cualquier zona de costado, se mantendrá un valor constante.

El módulo resistente de los refuerzos longitudinales secundarios viene dado por:

$$Z = \frac{83 * l^2 * s * p * w * k}{\sigma} \quad (132)$$

Dónde:

- S: 0.5
- P: presión de los costados calculada.

$$Z = 463.30 \text{ cm}^3$$

### 8.8.3 Cubiertas

El escantillonado de cualquier cubierta que no se la de carga se calcula mediante una formula genérica para todas ellas.

$$t = t_o + \frac{K*L1}{\sqrt{f1}} + t_k \quad (133)$$

Dónde:

- To: 5.5 para cubiertas de carga
- K:0.02 para una sola cubierta continua.

Con los datos anteriores, el espesor de las planchas de cubierta debe ser de:

$$t = 10.63 \text{ mm}$$

El resto de las cubiertas, tanto debajo como por encima de la de carga, se dimensionan siguiendo la misma expresión y con un factor K=0.01.

El espesor de la 2ª cubierta no puede ser menor de:

$$t = 8.81 \text{ mm}$$

El módulo resistente mínimo de los refuerzos de la cubierta de carga será:

$$Z = \frac{83 * l^2 * s * p * w k}{\sigma} \quad (134)$$

Dónde:

- P: presión de cubierta.
- S: 0.5

$$Z = 533.22 \text{ cm}^3$$

Con la misma expresión y sustituyendo la presión por la de la segunda cubierta, se puede determinar el módulo resistente mínimo de los refuerzos de 2ª cubierta.

$$Z = 204.66 \text{ cm}^3$$

Los refuerzos primarios de cubierta, conocidos como baos (transversal) y eslora (longitudinal), deberán tener un espesor mínimo de:

$$t = 5 + \frac{KL1}{\sqrt{f1}} + t_k \quad (135)$$

$$t = 10.1 \text{ mm}$$

Además, las esloras deberán tener un módulo resistente mínimo de:

$$Z = \frac{100 \cdot S^2 \cdot b \cdot p \cdot w_k}{\sigma} \quad (136)$$

Dónde:

- S: 5 m
- P: 291.83 Kn/m<sup>2</sup>

$$Z = 235342.65 \text{ cm}^3$$



Más adelante, al calcular el módulo resistente obtenido del escantillonado y dimensionamiento de refuerzos, se obtiene que el módulo de cada una de las esloras es de 540030 cm<sup>3</sup>, por lo que cumple el requisito.

#### 8.8.4 Mamparos

El espesor de los mamparos no será menor de lo calculado de la siguiente formula:

$$t = 5 + \frac{KL1}{\sqrt{f1}} + t_k \quad (137)$$

K=0.03 para los mamparos longitudinales, siendo este el mayor valor tomado por K.

$$t = 11.95 \text{ mm}$$

Los refuerzos que se sitúan en los mamparos deberán tener un mínimo modulo resistente de acuerdo con la expresión siguiente:

$$Z = \frac{83 * l^2 * s * p * wk}{\sigma} \quad (138)$$

$$Z = 191.03 \text{ cm}^3$$

## 8.9 Estructuras transversales

Las bulárcamas del doble fondo deberán tener un módulo resistente mínimo que cumpla la expresión siguiente:

$$Z = \frac{0.63 \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k}{f_1} \quad (139)$$

Dónde:

- L: distancia entre bulárcamas. 2,4 m
- S: distancia entre los refuerzos perpendiculares a las bulárcamas. 0.5 m.
- Wk: 1.15
- P: 282.62 KN/m<sup>2</sup>

$$Z = 589.70 \text{ cm}^3$$

Las bulárcamas en los costados tendrán un módulo resistente mínimo dado por la siguiente expresión:

$$Z = \frac{C \cdot l^2 \cdot s \cdot p \cdot w_k}{f_1} \quad (140)$$

C: toma un valor de 0.37 para la presión externa.

$$Z = 5188.54 \text{ cm}^3$$

Las vigas/refuerzos principales de costado tendrán un módulo resistente mínimo de:

$$Z = \frac{100 \cdot S^2 \cdot b \cdot p \cdot w_k}{\sigma} \quad (141)$$

Dónde:

- S: 0.6 que corresponde a la separación en vertical entre ellos.
- B: manga del buque.
- P: 269.66 KN/m<sup>2</sup>

$$Z = 3131.48 \text{ cm}^3$$

Los refuerzos transversales de cubierta, también llamados baos tendrán un escantillado de 11 mm (calculado anteriormente) y el módulo resistente vendrá dado por la siguiente expresión:

$$Z = \frac{0.63 * l^2 * S * p * w k}{f_1} \quad (142)$$

El valor de la presión ya calculado es:

P: 291.83 KN/m<sup>2</sup>

$$Z = 608.92 \text{ cm}^3$$

Los refuerzos transversales y verticales de los mamparos vienen dados por la misma expresión:

$$Z = \frac{100 * l^2 * S * p * w k}{\sigma m} \quad (143)$$

Dónde:

- $\sigma m$ : 220\*7.5 en estructura vertical
- $\sigma m$ : 220\*10 en estructura transversal

$$Z_{vertical} = 211.29 \text{ cm}^3$$

$$Z = 158.46 \text{ cm}^3$$

Las vigas principales de los mamparos deberán tener un módulo resistente mínimo:

$$Z = \frac{100 \cdot S^2 \cdot b \cdot p \cdot w \cdot k}{\sigma} \quad (144)$$

$$Z = 48507.2156 \text{ cm}^3$$

## 8.10 Elección de perfiles

Una vez determinados los espesores mínimos requeridos por normativa de las planchas, y los módulos resistentes de los principales refuerzos estructurales del buque, ya se puede proceder a la elección de los perfiles necesarios.

Los perfiles escogidos son los de “llanta con bulbo”, altamente extendidos en la construcción naval.

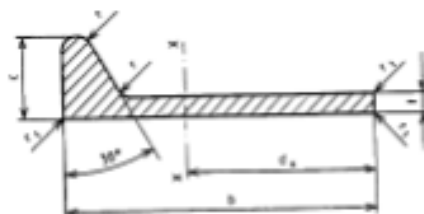


Figura 112, perfil de llanta con bulbo de uso naval

Zona del buque	Perfil	Área(cm <sup>2</sup> )	Inercia del elemento(cm <sup>4</sup> )	Modulo resistente(cm <sup>3</sup> )
Fondo	400x14	81.48	12924	507
Doble fondo	280x12	45.48	3647	206
Cubierta	400x15	85.48	13573	538
2ª cubierta	280x12	45.48	3647	206
Costados	320x12	54.25	5525	275
Mamparos	180x9	20.66	664	61.8
Refuerzos primarios (vagras y esloras)	180x8	18.86	609	55.9

Tabla 74, perfiles utilizados en cada zona del buque

Además, el espesor de las planchas finalmente escogido es el siguiente:

<b>Quilla</b>	18	Cm
<b>Fondo y pantoque</b>	14	Cm
<b>Doble fondo</b>	12	Cm
<b>Costado</b>	14	Cm
<b>Mamparos</b>	12	Cm
<b>Cubiertas</b>	11	Cm
<b>2ªcubierta</b>	9	Cm
<b>Vagras/Varengas</b>	15	Cm
<b>Esloras/Baos</b>	11	Cm

**Tabla 75, espesores escogidos**

## 8.11 Comprobación de cumplimiento de la cuaderna maestra

### 8.11.1 Módulo mínimo requerido

Dado que el momento obtenido de los análisis de maxsurf es mayor que los calculados en la normativa, el módulo resistente se calculará de la siguiente manera

$$Z = \frac{M_s + M_w}{\sigma} * 10^3 \quad (145)$$

Dónde:

- $M_s + M_w$ : es el momento calculado por DNV. Equivale a 3.611.507 KN\*m.
- $\sigma$ : 175 KN/m<sup>2</sup>

$$Z = 2.0637 * 10^7 \text{ cm}^3$$

Además, se debe cumplir que el módulo de sección, respecto el eje horizontal no puede ser menor de:

$$Z_0 = \frac{C_{wo}}{f_1} * L^2 * B * (Cb + 0.7) \quad (146)$$

$$Z_0 = 2.0307 * 10^7 \text{ cm}^3$$

Y el módulo de sección mínimo respecto el eje vertical no será menor de:

$$Z_o = \frac{5}{f_1} * L^2 * (T + 0.3 * B) * Cb \quad (147)$$

$$Z_o = 2.759 * 10^7 \text{ cm}^3$$

### 8.11.2 Módulo resistente obtenido

Una vez dimensionado el escantillonado y los refuerzos del buque, se puede calcular el módulo resistente de la cuaderna maestra. Este se comparará con el obtenido por los cálculos de la normativa, debiendo ser mayor para garantizar la integridad estructural.

Las fórmulas y parámetros usados son los siguientes:

- $d$ : distancia a la línea base
- $D$ : distancia mayor de eje neutro a fibra más alejada
- $I_0$ : inercia del elemento respecto su CG.
- $I$ : inercia respecto el eje neutro
- $A*d$ : Inercia estática
- $A*d^2$ : Inercia elástica

Para ello se ha realizado una tabla en el programa Microsoft Excel que incluye los cálculos que se explican a continuación:

1. Se calcula el área de cada uno de los elementos.
2. Se obtiene el área total de cada elemento siempre y cuando haya más de uno de un mismo tipo.
  - 2.1 Se calcula la distancia al eje neutro respecto la línea base.

$$d = \frac{\text{Suma}(\text{Area} * Yg)}{\text{Suma}(\text{Area})} = 604.52 \text{ cm} \quad (148)$$

3. Se calcula la distancia entre el centro de gravedad del elemento/s y la línea base de buque.
4. Se calcula la inercia de cada uno de los elementos respecto su propio centro de gravedad.
5. Se calcula la inercia total de cada elemento respecto la línea base del buque.
6. Se calcula la inercia total de todos los elementos respecto el eje neutro calculado con la expresión que sigue:



$$=\sum(Iy)-(\sum(\text{Áreas})-(d)^2) \quad (149)$$

$$I_{total} = 1.0378 * 10^{12} cm^4$$

7. Se calculo la distancia a la fibra más alejada respecto al eje neutro.

$$d = D - \text{eje neutro} \quad (150)$$

$$d = 646.47 \text{ cm}$$

8. Se calcula el módulo resistente de la cuaderna maestra a partir de los datos calculados hasta ahora:

$$Z = 1.6067 * 10^9 cm^3$$

Se puede comprobar el que el calculado a partir del dimensionamiento es mucho mayor que el mínimo requerido por la normativa, por tanto, se puede afirmar que cumple los requisitos.

$$Z = 2.0637 * 10^7 cm^3$$

	N <sup>a</sup>	A(cm2)	D(cm)	A*d(cm2)	A*(d^2) (cm3)	I0(cm4)	I total(cm4)
<b>Quilla</b>	1	360	0.9	324	291.6	97.2	388.8
<b>Fondo</b>	1	6003.2	0.7	4202.24	2941.568	980.5226667	3922.090667
<b>Doble fondo</b>	1	5385.6	299.4	1612448.64	482767122.8	646.272	482767769.1
<b>Cubierta</b>	1	4936.8	1250.45	6173221.56	7719304900	497.794	7719305397
<b>2ª Cubierta</b>	1	4039.2	999.55	4037382.36	4035565538	272.646	4035565811
<b>Costado</b>	2	2800	500	1400000	350000000	116666666.7	933333333.3
<b>Pantoque</b>	2	2235.74	47.91	107114.3034	2565923.138	732000	6595846.276
<b>Mamparo</b>	5	75060	625.5	46950030	5873448753	1.95782E+11	1.00828E+12
<b>Esloras</b>	4	1100	1125	1237500	348046875	1432291.667	1397916667
<b>Vagras</b>	4	1800	150	270000	10125000	3375000	54000000
<b>R. 2 Cubierta</b>	62	2819.76	999.75	2819055.06	45457262.84	3647	2818576410
<b>R. Cubierta</b>	80	6838.4	1249.75	8546290.4	133509080.3	13573	10681812267
<b>R. Costado</b>	2	108.5	200	21700	2170000	54.55	4340109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	250	27125	3390625	54.55	6781359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	350	37975	6645625	54.55	13291359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	400	43400	8680000	54.55	17360109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	450	48825	10985625	54.55	21971359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	500	54250	13562500	54.55	27125109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	550	59675	16410625	54.55	32821359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	600	65100	19530000	54.55	39060109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	650	70525	22920625	54.55	45841359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	700	75950	26582500	54.55	53165109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	750	81375	30515625	54.55	61031359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	800	86800	34720000	54.55	69440109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	850	92225	39195625	54.55	78391359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	900	97650	43942500	54.55	87885109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	950	103075	48960625	54.55	97921359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	1050	113925	59810625	54.55	119621359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	1100	119350	65642500	54.55	131285109.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	1150	124775	71745625	54.55	143491359.1
<b>R. Costado</b>	2	108.5	1200	130200	78120000	54.55	156240109.1
<b>R. Mamparos</b>	5	103.3	75	7747.5	116212.5	20.2	581163.5

R. Mamparos	5	103.3	150	15495	464850	20.2	2324351
R. Mamparos	5	103.3	225	23242.5	1045912.5	20.2	5229663.5
R. Mamparos	5	103.3	387.5	40028.75	3102228.125	20.2	15511241.63
R. Mamparos	5	103.3	475	49067.5	4661412.5	20.2	23307163.5
R. Mamparos	5	103.3	562.5	58106.25	6536953.125	20.2	32684866.63
R. Mamparos	5	103.3	650	67145	8728850	20.2	43644351
R. Mamparos	5	103.3	737.5	76183.75	11237103.13	20.2	56185616.63
R. Mamparos	5	103.3	825	85222.5	14061712.5	20.2	70308663.5
R. Mamparos	5	103.3	912.5	94261.25	17202678.13	20.2	86013491.63
R. Mamparos	5	103.3	1083.3	111904.89	24245313.47	20.2	121226668.3
R. Mamparos	5	103.3	1166.63	120512.879	28118788.01	20.2	140594041
R:Vagras	4	75.44	75	5658	106087.5	18.53	424424.12
R:Vagras	4	75.44	150	11316	424350	18.53	1697474.12
R:Vagras	4	75.44	225	16974	954787.5	18.53	3819224.12
R:Fondo	72	5866.56	1.25	7333.2	127.3125	12924	939694.5
R:Doble fondo	62	2819.76	301.25	849452.7	4127381.063	3647	256123739.9
R:Esloras	4	75.44	1080.3	81497.832	22010526.98	18.53	88042182.03
R:Esloras	4	75.44	1160.6	87555.664	25404275.91	18.53	101617177.8
R:Pantoque	2	162.96	76.85	12523.476	481214.5653	11768	985965.1306
R:Pantoque	2	162.96	94.4	15383.424	726097.6128	9101	1470397.226
R:Pantoque	2	162.96	112.67	18360.7032	1034350.215	8004	2084708.43
R:Pantoque	2	162.96	120.49	19635.0504	1182913.611	6852	2379531.223
R:Pantoque	2	162.96	131.3	21396.648	1404689.941	5761	2820901.882

Tabla 76, tabla resume de las inercias proporcionadas por cada elemento

## Capítulo 9. Francobordo y Arqueo

En el presente capítulo se llevan a cabo os cálculos de francobordo y arqueo.

Mediante la normativa seguida a lo largo del proyecto [5] y todos los valores hasta ahora obtenidos del diseño del buque se pueden desarrollar una serie cálculos simples que permiten fijar las líneas de carga de la embarcación, también conocido como el francobordo, y también nos permite medir la capacidad comercial del buque, conocido como Arqueo.

## 9.1 Francobordo

El cálculo del francobordo se efectúa siguiendo el “Convenio internacional sobre las líneas de carga de 1966” [3], que es aplicable a todos los buques de eslora igual, o superior a 24 metros.

Según el convenio, el francobordo se define como la distancia vertical medida en la sección media del buque desde el costado superior de la cubierta principal hasta la línea de flotación en carga. Dicha medida se puede conocer gracias al disco Plimsoll.

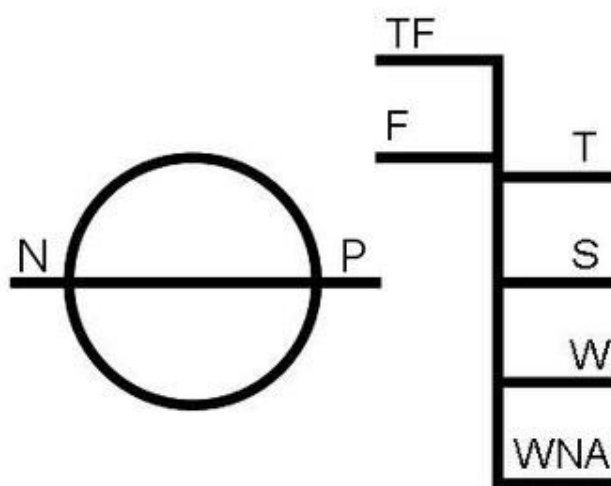


Figura 113, disco Plimsoll

El anillo de la izquierda indica el francobordo mínimo de verano. Este debe tener unas medidas específicas dadas por el convenio, siendo un círculo de 300 mm de diámetro exterior y 25 mm de espesor, con una línea que cruza por su centro de 450mm y mismo espesor.

A su lado se dibuja un peine que indica el francobordo mínimo según la época del año y del tipo de agua por el que se navega.

Funciones del francobordo mínimo:

- En navegación en mala mar, el francobordo establece una reserva de flotabilidad.
- Garantiza una mejor estabilidad en avería.
- El francobordo aumenta el ángulo de estabilidad nula.

### 9.1.1 Consideraciones

- Se considera un buque de tipo B, para transporte de cargas no liquidas.
- La "eslora" utilizada será igual al 96% de la eslora total de una flotación situada a una distancia por encima de la quilla igual al 85% del puntal.
- El coeficiente de bloque se calcula al 85% del puntal.

$$Cb = \frac{\Lambda}{L*B*T} \quad (151)$$

- La manga será la máxima del buque en la cubierta de carga.
- El puntal de trazado (D) corresponde al máximo puntal hasta la cubierta de carga. Y el calado T' corresponde al 85% de D.
- El castillo de proa es la estructura que va desde la cubierta de carga hasta el inicio de la superestructura de habilitación de la tripulación
- La superestructura del buque se toma aquello destinada a la habilitación y gobierno del buque.

Los datos se muestran en la siguiente tabla:

<b>L</b>	181.85	m
<b>B</b>	44.88	m
<b>D</b>	12.51	m
<b>T'</b>	10.63	m
<b>Cb</b>	0.8043	

**Tabla 77, dimensiones para el cálculo de francobordo**

### 9.1.2 Francobordo tabular y correcciones

El francobordo tabular se obtiene por interpolación lineal de los valores obtenidos de la tabla siguiente:

Eslera del buque (metros)	Francobordo (milímetros)	Eslera del buque (metros)	Francobordo (milímetros)	Eslera del buque (metros)	Francobordo (milímetros)
126	1815	163	2580	200	3264
127	1837	164	2600	201	3280
128	1859	165	2620	202	3296
129	1880	166	2640	203	3313
130	1901	167	2660	204	3330
131	1921	168	2680	205	3347
132	1940	169	2698	206	3363
133	1959	170	2716	207	3380
134	1979	171	2735	208	3397
135	2000	172	2754	209	3413
136	2021	173	2774	210	3430
137	2043	174	2795	211	3445
138	2065	175	2815	212	3460
139	2087	176	2835	213	3475
140	2109	177	2855	214	3490
141	2130	178	2875	215	3505
142	2151	179	2895	216	3520
143	2171	180	2915	217	3537
144	2190	181	2933	218	3554

**Figura 114, tabla de francobordos tabulares de DNV**

Eslora	Francobordo tabular	
181	2405	m
181.85	2414.35	m
182	2416	m

Tabla 78, francobordo tabular obtenido por interpolación

#### 9.1.2.1 Corrección por coeficiente de bloque

$$C1 = \frac{Cb+0.68}{1.36} \quad (152)$$

$$C1 = 1.0914$$

#### 9.1.2.2 Corrección por puntal

Aplicable cuando el puntal es mayor que  $L/15$ .

$$L/15 = 12.12 < 12.51$$

Se cumple que el puntal del buque proyecto es mayor, de modo que se aplicara la siguiente corrección:

$$C2 = \left(D - \frac{L}{15}\right) * R \quad (153)$$

Dónde:

- R:250

$$C2 = 96.66 \text{ mm}$$



### 9.1.2.3 Corrección por superestructuras

La reducción por superestructura se calcula en función del % que representa la misma dentro de la eslora del buque. Y multiplicando el resultado por 1070 mm, valor dado por la normativa para eslora superiores a 122 m.

La longitud de la superestructura es de 25 m.

$$R\% = \frac{25}{181.85} = 0.1376 \quad (154)$$

Para la relación obtenida, se obtiene un porcentaje de reducción por interpolación línea de 9.63.

*Porcentaje de reducción para buques de tipo "A"*

	Longitud efectiva total de superestructuras y troncos										
	0	0,1 L	0,2 L	0,3 L	0,4 L	0,5 L	0,6 L	0,7 L	0,8 L	0,9 L	1,0 L
Porcentaje de reducción para todos los tipos de superestructuras	0	7	14	21	31	41	52	63	75,3	87,7	100

**Figura 115, reducción por superestructuras**

$$C3 = 1070 * (\%) \quad (155)$$

$$C3 = 103.07 \text{ mm}$$

#### 9.1.2.4 Corrección por arrufo

El convenio da unos valores de arrufo normales en función de la eslora, que aplicado al buque son los siguientes:

Posición	Altura normal(mm)	Factor
Pp	1765.44	1
1/6 desde Pp	783.85	3
1/3 de Pp	197.72	3
Centro	0	1
1/3 de Pr	395.45	3
1/6 de Pr	1567.71	3
Pr	3530.88	1

Tabla 79, tabla de arrufos normales

Se aplica un suplemento de arrufo debido a la existencia de una superestructura:

$$S = \frac{y * L'}{3 * L} \quad (156)$$

Dónde:

- Y: Diferencia entre altura real y normal en el extremo de la línea de arrufo.
- L': Longitud de la superestructura
- L: Eslora anteriormente definida

La altura normal de la superestructura viene definida por el convenio como 2.3 metros para eslora superiores a 125 m.

La altura del castillo se toma desde la cubierta de carga hasta la más alta estanca. Donde empieza la superestructura de habilitación.

$$H = 12.5 \text{ metros}$$

$$L = 42 \text{ metros}$$

$$S = \frac{(12500-2300)*42}{3*181.67} = 786.017 \text{ mm} \quad (157)$$

Para obtener los valores de defecto o exceso de arrufo en proa y popa se efectúa el siguiente calculo:

$$A_{normal} = \frac{\sum(alturas*factor)}{8} \quad (158)$$

$$A_{real} = \frac{\sum(alturas*factor)}{8} + S \quad (159)$$

Efectuando los cálculos para proa y popa obtenemos las diferencias entre las alturas reales y normales.

$$D_{pr} = -391.53 \text{ mm}$$

$$D_{pp} = -588.77 \text{ mm}$$

La corrección final por arrufo se calcula de la siguiente manera:

$$C4 = \frac{D_{pr}+D_{pp}}{2} * \left(0.75 - \frac{S}{2LOA}\right) \quad (160)$$

$$C4 = 310.90 \text{ mm}$$

### 9.1.3 Francobordos mínimos

Aplicando las correcciones obtenidas, se pueden calcular los francobordos mínimos de verano, invierno, agua dulce y aguas tropicales.

Francobordos mínimos		
Diseño	3320	mm
Verano	2842.99457	mm
Tropical	2641.59863	mm
Invierno	3044.39052	mm
Invierno Atlántico	3044.39052	mm
Agua dulce	2542.20236	mm

Tabla 80, resultados de francobordo

### 9.1.4 Altura mínima de proa

Según el convenio, la distancia vertical mínima desde la cubierta hasta la flotación de verano, medida en proa no será menor de:

$$H = 56 * L \left( 1 - \frac{LOA}{500} \right) * \frac{1.36}{Cb+0.86} \quad (161)$$

$$H = 5406.61 \text{ mm}$$

La altura de la superestructura y de las cubiertas en proa son superiores a la obtenida, por tanto, cumple los requisitos.

## 9.2 Arqueo

El arqueo es un valor que mide la capacidad de carga y comercial del buque. A efectos prácticos sirve para determinar la cantidad de impuestos que debe pagar el buque al cruzar ciertos canales importantes como el de panamá.

Para ello se hace según el convenio del 23 de junio de 1969 del arqueo [4].

Se diferencia entre dos arqueos:

- Neto(NT): Expresión del tamaño utilizable del buque.
- Bruto(GT): Expresión del tamaño máximo de un buque.

El conocimiento de estos valores de espacios y volúmenes totales y de carga permite saber que normas aplicar a la seguridad del buque.

### 9.2.1 Consideraciones

- Puntal de trazado, con un valor de  $D=12.51$  m
- $T'$  es el calado de trazado
- N1: Número de pasajeros en camarotes de menos de 8 literas (22)
- N2: El capitán y suboficiales. (3)
- V: Corresponde al volumen total cerrado del casco, los *casings* de popa y la superestructura.

Representa un total de 120486.27 m<sup>3</sup>.

- Vc: Corresponde al volumen de carga, que, al no tener, se tomará el valor mínimo que estipula el convenio.

### 9.2.2 Arqueo bruto

Es un valor que representa el tamaño total de la embarcación. Representa todos aquellos espacios cerrados entre el plan y la cubierta alta. Se calcula con la siguiente expresión:

$$GT = K1 * V \quad (162)$$

Dónde:

- V= Volumen disponible cerrado.

K1 se calcula mediante otra expresión, función del Volumen.

$$K1 = 0.2 + 0.02 * \log_{10} V \quad (163)$$

De modo que el Arqueo Bruto (GT):

$$GT = 36340.918 \, tm$$

### 9.2.3 Arqueo neto

El Arqueo neto es el volumen del buque utilizable o destinado a la carga. Será siempre un valor inferior a GT y se calcula siguiendo la siguiente expresión:

$$NT = K2 * Vc * \left(\frac{4t'}{3D}\right)^2 + K3 * \left(N1 + \frac{N2}{10}\right) \quad (164)$$

Dónde:

$$K2 = 0.2 + 0.02 * \log_{10} Vc \quad (165)$$

Dónde:

-  $V_c$ : 0.25GT

$$K2 = 0.2791$$

$$K3 = 1.25 * \left( \frac{10000 + GT}{10000} \right) = 5.79 \quad (166)$$

$\left( \frac{4t'}{3D} \right)^2$  no se tomará mayor que 1.

$$\left( \frac{4t'}{3D} \right)^2 = 0.9593 \quad (167)$$

$K2 * V_c * \left( \frac{4t'}{3D} \right)^2$  se tomará un valor de 25% de GT.

NT no será inferior a 30% de GT.

$$NT = 0.2791 * V_c * \left( \frac{4t'}{3D} \right)^2 + K3 * \left( N1 + \frac{N2}{10} \right)$$

$$NT = 9085.2295 + 5.79 * \left( 22 + \frac{3}{10} \right)$$

$$NT = 9123.44 \text{ tm}$$

Como este valor es inferior a 0.3GT, el arqueo neto quedará como:

$$NT = 0.3GT = 10902.27 \quad (168)$$

## Capítulo 10. Conclusiones

En el presente capítulo se expondrán las conclusiones del trabajo, aquello que se ha aprendido, lo que se puede mejorar y posibles cambios y mejora que pueden implementarse.

A continuación, se muestra una tabla con los resultados más característicos del buque proyecto obtenidos.

<b>Desplazamiento</b>	61240	Tm
<b>Cb</b>	0.768	
<b>LOA</b>	195.2	m
<b>Lpp</b>	186.6	m
<b>B</b>	44.88	m
<b>T</b>	9.19	m
<b>D</b>	12.51	m
<b>Ds</b>	21.23	m
<b>Carga máxima</b>	36331	Tm
<b>Motor Principal</b>	Wartsila 9L26	
<b>Motor Auxiliar</b>	Wartsila 9L20	
<b>Autonomía</b>	15000	Mn
<b>Tripulación</b>	25	
<b>Hélices principales</b>	Azipod XO 1600	
<b>Hélices de proa</b>	Wtt-18	
<b>GT</b>	36340.9	Tm
<b>NT</b>	9123.44	Tm
<b>Francobordo máximo/mínimo</b>	3.32/2.542	m
<b>Capacidad de lastre</b>	92820.74	m3
<b>Bombas de lastre</b>	Azcue LD/CM	

Tabla 81, características finales del buque



A lo largo del proyecto, y en cada uno de sus capítulos se ha tenido que lidiar con problemas, que, sobre la marcha se ha ido dándoles solución.

El principal inconveniente que presenta el proyecto conceptual de un buque heavy Lift semisumergible es la exclusividad y falta de información precisa de este tipo de embarcaciones. Al tratarse de buques de relativa novedad, y mucha escasez en el mercado naval actual (apenas hay unas tres empresas importantes), no hay características específicas predefinidas. Cada nuevo buque heavy Lift semisumergible construido tiene características distintas del anterior, y puede desempeñar funciones distintas.

En los primeros capítulos se hace patente la disparidad de tipos de buques que pertenecen a esta clase. Sus orígenes son distintos, en ocasiones de nueva construcción y en otras son adaptaciones de buques existentes. Por esta razón las dimensiones principales y las formas son tan variadas.

El caso más notorio es el de la construcción y diseño de un bulbo de proa. Según los cálculos realizados en el capítulo 3, y según *El proyecto básico del buque mercante* [26], este tipo de navíos no deberían llevar, pero las últimas construcciones, las más modernas, llevan el bulbo en proa.

La predicción de la potencia y diseño de la planta propulsora ha sido uno de los temas que más dificultad presenta, y que más veces ha sufrido modificaciones. De nuevo, nos encontramos ante el hecho de que cada buque del que se disponía base de datos tenía un sistema distinto, con uno o motores, hélices, disposición dentro de la eslora más a proa o a popa y diferentes sistemas de generación y transmisión. Finalmente, se dispuso la sala de máquinas aproada, para contrarrestar el peso de la carga que suele ir apopada, motivo por el cual la línea de ejes se descartó, ya que debería ser demasiado extensa. Finalmente, se optó por la opción de PODS, que dan mucha libertad al ser un sistema eléctrico.

Otra de las ventajas de los PODS es que permiten mantener la posición estable del buque sin demasiadas hélices, ya que los mismos PODS tiene la capacidad de moverse 360º sobre sí mismos.

La que, sin duda, ha sido la parte más trabajada y estudiada ha sido la estabilidad del buque. Tanto en condición de navegación, como transitoria, como en avería. Las escasas herramientas de las que se dispone han obligado a tener que cambiar constantemente la distribución interior del buque, teniendo que realizar un proceso iterativo y de corrección continua de los espacios del buque, del número de divisiones y las condiciones de carga. Es por ello por lo que los capítulos 5 y 6 se ha realizado de manera paralela.

Del dimensionamiento de la cuaderna maestra realizado, se pudo establecer una conclusión muy clara. Las normativas actuales sobredimensionan en exceso la estructura del buque. En el capítulo correspondiente a la estructura se puede ver cómo, cumpliendo los requisitos mínimos impuestos por la normativa seguida en el

proyecto, la integridad estructural y las tensiones que era capaz de resistir era exageradamente elevadas en comparación a los esfuerzos supuestamente sufridos.

### **Cambios que se pueden implementar y mejoras**

Habiendo finalizado el proyecto, se cree que la adición de un bulbo de proa se podría reducir considerablemente la resistencia al avance, y en consecuencia aumentar la velocidad operativa del buque o reducir su consumo. Además, al igual que algunos buques existentes, se podría dotar al buque de quillas de balance que aumentaría su estabilidad en navegación.

Por otro lado, otro cambio necesario sería el de realizar un análisis más exhaustivo de la estructura del buque. Para ello se podría usar algún software que permitirá calcular esfuerzos y tensiones, ajustando así los espesores de planchas y refuerzos de la sección maestra. Además, se podría añadir el cálculo de refuerzos en superestructura, en piques de proa debido a pantocazos y realizar una estimación de refuerzos extras en lugares de acumulación de tensiones.

Habiendo calculado la estructura con más precisión y seleccionando equipos para el buque, se podría calcular el presupuesto estimado para un proyecto de estas características.

### **Experiencia personal**

Personalmente creo que los resultados obtenidos han sido satisfactorios. Después de la multitud de problemas que han surgido y los constantes cambios a los que se ha sometido los cálculos, los resultados obtenidos están dentro de un rango de valores aceptables para esta clase de buques.

Considero que desarrollar este proyecto me ha puesto a prueba, enfrentándome a un reto como nunca, donde de manera autodidacta he tenido que buscar, leer, estudiar y entender multitud de documentos y archivos. Además, hay que añadirle todo el proceso de aprendizaje y perfeccionamiento de softwares tales como *Maxsurf*, *AutoCAD* y *Rhinoceros*.

No hay que olvidar tampoco el crecimiento personal que implica realizar un proyecto tan largo, el más largo hasta la fecha, al que se le ha invertido tanto tiempo. Este tipo de reto me ha permitido comprender el trabajo que hay detrás de grandes proyectos y lo importante que es la constancia y la dedicación, que espero en un futuro próximo, poder aplicar a mi vida laboral.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS).
- [2] Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL)
- [3] Convenio internacional sobre las líneas de carga, 1966. IMO
- [4] Convenio internacional sobre el arqueo de buques
- [5] Normativa Sociedad de Clasificación DNV (Det Nordske Veritas)
- [6] Organización marítima internacional, IMO. Resolution A751 (18) Interin Standard of Ships Manoeuvrability. (1993). Internanional Convention of the Prevention of Pollution from Ships., International Maritim Organiztation.
- [7] Juan A Oliveira. Buques semisumergibles heavy-lift. EL Blue Marlin. En: Va de barcos. 30/09/2013. Disponible en : <https://vadebarcos.net/2013/09/30/buques-heavy-lift-blue-marlin/>
- [8] Siarhei Lukashyk. Buques semisumergibles, los titanes del mar. Tenerife, 2015. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/1001/Buques%20semi-sumergibles%20Los%20titanes%20del%20mar.pdf?sequence>
- [9] Sebastián Rojo Garcia. Buques semisumergibles. 03/2012
- [10] Sebastián Rojo Garcia. Grandes retos de la teoría del buque. Buques semisumergibles para el transporte marítimo de cargas pesadas. Prácticos del puerto. 03/2012
- [11] BW offshore. Track record, projects delivered over the past decades. 23/04/2017. Disponible en: <http://www.bwoffshore.com/business/track-record/>
- [12] Gregory Colomar Lix. Los semisumergibles de cargas pesadas. Proyecto final de carrera 2011.
- [13] Página oficial de Hyinduai heavy industries, offshore and engineering. Julio 2017. Disponible en: <https://english.hhi.co.kr/>
- [14] Cosco shipping heavy transports. Diciembre 2017. Disponible en: <https://coscoht.com/about/>
- [15] Offshore heavy transports. Agosto 2017. Disponible en: <https://www.oht.no/>
- [16] Dockwise, Boskalis. Disponible en: <https://boskalis.com/about-us/dockwise.html>

[17] Diez pesos pesados. Los heavy Lift. Revista del sector marítimo de ingeniería naval. 25/01/2013.

Disponible en: <https://sectormaritimo.es/diez-pesos-pesados-los-heavy-lifts>

[18] Norberto Sánchez. Barcos muy especiales: Los Heavy Lift Carrier. En: Máquinas de barcos. 10/06/2013.

Disponible en: <http://maquinasdebarcos.blogspot.com.es/2013/05/barcos-muy-especiales-heavy-lift-carrier.html>

[19] Página oficial de construcción naval Damen Shipyards. Disponible en: <http://www.damen.com/>

[20] Los Buques semi-sumergibles más grandes del mundo Monstruos del mar y los gigantes de las olas

Enormes naves semisumergibles. Disponible en: <http://elhallador.blogspot.com.es/2014/05/los-buques-semi-sumergibles-mas-grandes.html>

[21] Página oficial de la naviera Ale. Disponible en : <http://www.ale-heavylift.com/>

[22] Proyecto del buque y artefactos navales. Asignatura Facultad de náutica de Barcelona. Julio García espinosa y José Enrique Gutiérrez Romero.

[23] David G.M Watson. Ship practical design. Elsevier Ocean engineering book series. 1998.

[24] M.Osama, A.Aly, A.Radwan. Heavy lift semi-submersible barge: A new tool for caissons conceptual design. International marine and offshore Engineering conference. IMOC 2014.

[25] Apostolos Papanikolaou. Methodologies of preliminary ship design. 2014. ISBN 978-94-017-8750-5

[26] Ricardo Alvariño Castro, Juan Jose Aspiroz Aspiroz y Manuel Meizoso Fernandez. Madrid, 1997. El Proyecto básico del buque mercante. Editorial del colegio oficial de ingenieros navales. ISBN 84-921750-2-8

[27] Curso de capitán de yate. Escuela náutica ALAVELA. Teoría del buque.

[28] Harry Gonzalez. Representación de las formas de un buque. 05/06/2011. Disponible en: <http://arquitecturabuque.blogspot.com.es/2011/07/representacion-de-las-formas-de-un.html>

[29] Carlos Fernández Valdomir. Fast ferry catamarán 950 pax y 250 coches. Universidad de a Coruña. T Proyecto de final de grado, cuaderno 3, formas del buque. 2'013-2014.

[30] Luis Perez Rojas, Adolfo Maron Loureiro, Raul ateinza martin. Efecto del bulbo de proa en el comportamiento del buque en la mar. Ministerio de defensa. 10/2000.

[31] DNV Pt3 Ch2. Hull general arrangements. 2015

- [32] Holtrop, J.: A statistical re-analysis of resistance and propulsion data., International Shipbuilding Process (1984)
- [33] Holtrop, J., Mennen, G. G. J.: An approximate power prediction method., International Shipbuilding Process (1982)
- [34] Paquete de software Maxsurf Modeler V.21
- [35] Construcción naval, plano de formas. Atmosferis.com , información sobre la industria y el transporte marítimo. 08/08/2013. Disponible en: <http://www.atmosferis.com/construccion-naval-plano-de-formas/>
- [36] Paquete de software AutoCAD de Autodesk 2016.
- [37] John L. Beveridge. Design and performance of bow thrusters. Naval ship research and development center. 07/1971 <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/731997.pdf>
- [38] Holtrop J. y Mennen. An approximate power prediction method. 1978. Marin, Wageningen.
- [39] Gerard Royo Cuixeres. DIMENSIONAMIENTO, PREDICCIÓN DE POTENCIA Y DISEÑO DE LAS HéLICE Y TIMÓN DE UN BUQUE MERCANTE. FNB 2011.
- [40] Roll Royce. Hybrid and electric propulsion systems. [marzo 2017]. Disponible en URL: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/hybridelectric-propulsion-systems.pdf>
- [41] Paquete de software Maxsurf Resistance V.21
- [42] Wartsila. Generating sets. Disponible en: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets>
- [43] K Kokkila. Feasibility of Electric Propulsion for Semi-submersible Heavy Lift Vessels Marine Heavy Transport & Lift III, 24–25 October 2012, London, UK.
- [44] Software Navcad. Software informático de análisis y predicción de potencia para embarcaciones HydroComp NavCad 2004.
- [45] Los principales sistemas de propulsión utilizados en los buques actuales. Diario de náutica.com. 11/2017 Disponible en: <http://www.diariodenautica.com/los-principales-sistemas-de-propulsion-utilizados-en-los-buques-actuales>.
- [46] Excel Series B de Wageningen proporcionado en la asignatura de artefactos navales.

- [47]Azipod gearless propulsión. Disponible en: <http://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/electric-propulsion/azipod>
- [48]Marta Elisa Ibarrondo Girón. Heavy Lift special Caro vessel. Proyecto final de carrera. Madrid.2015
- [49]Mahanasundaram, Prakash. Master tesis “Structural analysis of a heavy Lift vessel”.2009
- [50]Proyecto del Buque. El sistema propulsivo del buque. UPC 2012. Disponible en: <https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=17395/2011/1/53657/22828-3100.pdf>
- [51]TERESA MARTÍNEZ CREIXENTI. Sistemas de hélices de proa: Operación, requerimientos y mantenimiento. UPC 2009.
- [52] DNV PT6 Ch 2. Propulsion, power generation and auxiliary systems.
- [53] Jurado J. Apuntes de la asignatura Propellers, Facultad de Náutica de Barcelona UPC
- [54] DNV Pt 3 Ch 2. General arrangements design.
- [55] Software Microsoft excel 2016.
- [56]Juan Carlos Díaz Lorenzo. Puente de mando. Artículos sobre buques semisumergibles fotografiaos y fondeados.05/2016
- [57] Carlos Palos Forcada. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN BUQUE DURANTE LA OPERACIÓN DE DESCARGA DE UNA CARGA PESADA. FNB-UPC. Otoño 2014.
- [58] DNV PT5 Ch 10. Vessels for special operations.
- [59]Kristian Alarcón Olsson. Cálculo de estabilidad del dique flotante y mejora del error de calculo del volumen de carena. Universiad politécnica de cargatena.2013
- [60]Jose Luis Aguilar Vázquez. Estabilidad del buque ultra heavy Lift Carrier. Teisis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. 05/2012
- [61] Rajeev Jassal.A complete guide to understand damage stability better. 4/7/2017
- [62]Software Maxsurf stability
- [63] DNV Pt 3 Ch 1. Hull structural design for ships above 100 m long.
- [64]Mahanasundaram, Prakash. Master tesis “Structural analysis of a heavy Lift vessel”.2009
- [65]Prontuario de perfiles comercialesUAHE-2001

[66]Software Rhinoceros McNeel 2016.

[67]Resistencia de secciones. Universidad politécnica de Cartagena. 2006

[68]Pablo ceña Martínez, Alberto torres Benayas. Petrolero crudo panamax 65000 tpm. Escuela técnica superior de ingenieros navales.2011

[69] Recommended practice DNV RP-C205. Environmental conditions and environmental loads. October 2010

[70] DNV Pt 3 Ch3. Hull equipment and safety/ Structural design principles.

[71] DNV Pt 5 Ch 7. Offshore service vessels, tugs and special vessels.

[72] Watson D.G.M. Practical ship design. Elsevier ocean engineering book series

[73] Fredrik major, CBDO at Sevan Marine ASA. Benefits of a cylindrically shaped floater for an FPSO application in cyclone exposed environments. Página oficial de Sevan drilling. 14/10/2013Diciembre de 2017. Disponible en: [file:///C:/Users/oriol/Downloads/01\\_Sevan\\_Fredrik+Major.pdf](file:///C:/Users/oriol/Downloads/01_Sevan_Fredrik+Major.pdf).

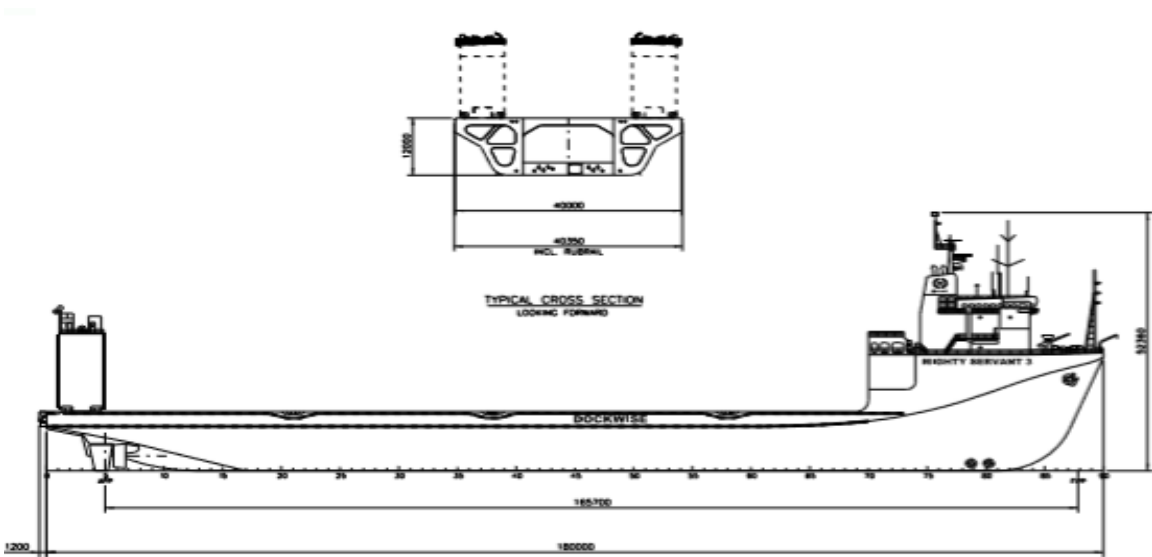
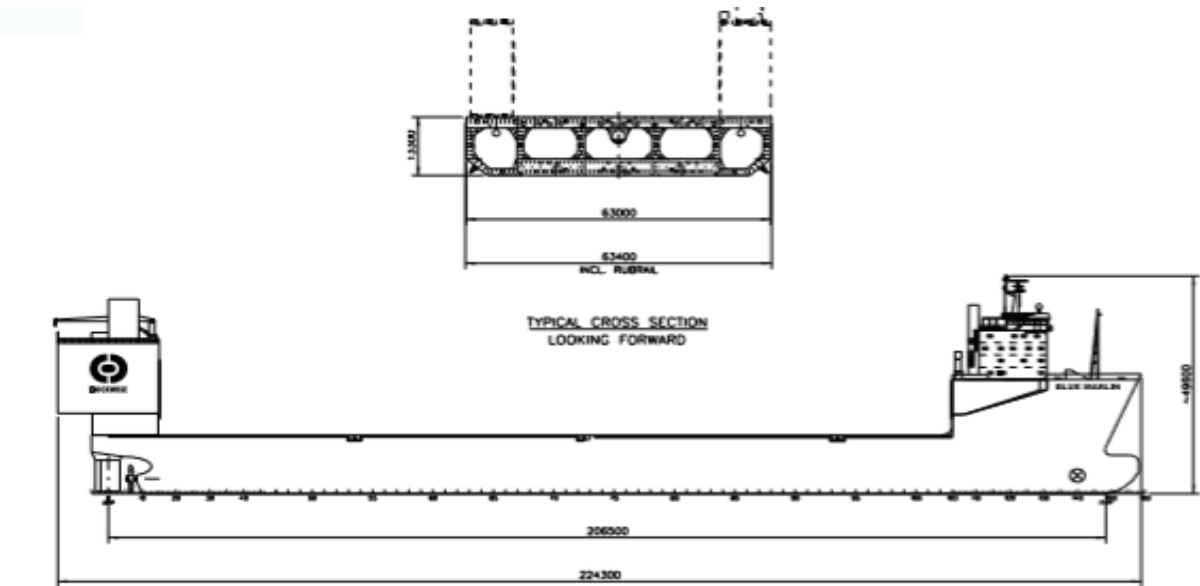


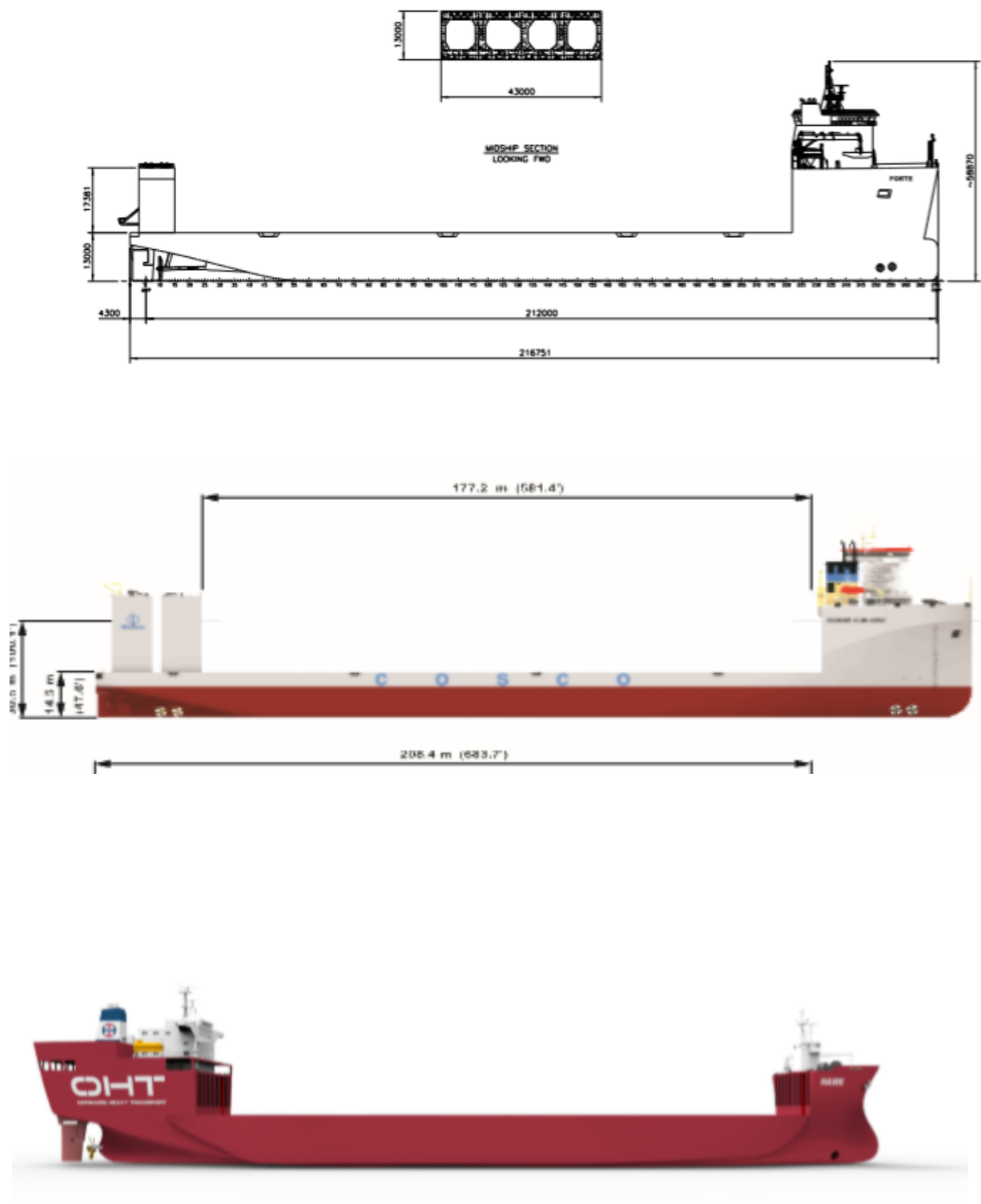
## Anexo 1: Base de datos ampliada

Nombre	LOA(m)	Lpp (m)	B(m)	D(m)	Ds (m)	Dcub (m)	T(m)	POWER(KW)	DWT™	V (kn)	L cubierta
Blue Marlin	224.8	206.5	63.08	13.3	28.4	14	10.24	23620	76061	13	178.2
Docwise Vanguard	275		70	15.5	31.5	16	10.99	28500	117000	14.5	275
Finesse	216		43	13	26	13	9.6	16470	48000	14	177.6
Transshelf	173		40	12	21	9	8.8	16420	34030	15.6	132
Forte	216	212.1	43	13	26	13	9.69	16470	48000	14	177.6
Triumph	216.8	209.7	45	14	23	9	10.4	15552	53818	14.5	
kang sheng kou	156	145	36	10	19	9	7.4	11600	20131		125
White Marlin	216.7	212.1	63	13	26	13	10	16728	72146	14.5	177.6
Black Marlin	217.8	206.5	42	13.3	23.4	10.1	10.11	12640	57021	14.5	178
Tai An Kou	156	145	36	10	19	9	7.5	11600	20131	13.5	125
Xiang He Kou	216.7	212.1	43	13	26	13	9.7	13500	48163	13.5	177.6
Xiang Rui Kou	216.7	212.1	43	13	26	13	9.7	12900	48232	13.5	177.6
Xiang Yun Kou	216.7	212.1	43	13	26	13	9.7	12900	48232	13.5	177.6
Xia Zhi Yuan 6	195.2	182.3	41.5	12	23	11	8.8	15000	38000	13.5	153.6
Xin Guang Hua	255	250.2	68	14.5	30.5	16	10.5	31500	98000	13.5	208.04
Mighty Servant 3	181.23	168.93	40	12	22	10	9.5	14220	27720	15.16	140
Mighty Servant 1	190.03	174.7	50	12	24	12	8.7	14220	40190	15	150
Explorer	158.9		31	5.3	11	5.7		5560	10763		95
Super Servant 3	139.09	130.41	32	8.5	14.5	6	6.3	6250	14138	13.8	116
Super Servant 4	169.49	160.41	32	8.5	11.45	2.95	5.4		17600	15	146

<b>Osprey</b>	223.07	214.07	44.5	13	23.5	10.5	10	13376	54000	13	157
<b>Hawk</b>	223.07	214.07	55.5	13	23	10	10.06	13321	64900	12.5	157
<b>Eagle</b>	199.33	191.3	42	11	19.5	8.5	8	15088	31907	13	113.7
<b>Albatross</b>	204.325	191.3	42.5	11.85	21.35	9.5	8.57	14940	34797	14	129.5
<b>Falcon</b>	199.33	191.3	42	11	19.5	8.5	8	15088	31809	13	113.7
<b>Fjell</b>	146.3	137	36		16.4		6.4		19300	12	119.8
<b>Fjord</b>	159.2	157.8	45.5	9	17.1		6.1				139.2
<b>Teal</b>	180.8	171.4	32.3	13.3	19.6		10		32101	15	126.6
<b>Switt</b>	181		32.2	13.3	19.6		9.5		32650		126.6

# Anexo 2: Buques con y sin bulbo de proa.







## Anexo 3: Cálculos de estabilidad

### Calado mínimo

#### Equilibrio hidrostático

Calado	8.001	M
Desplazamiento	51697	T
Escora	0.0	º
Calado en proa	7.947	M
Calado en popa	8.055	M
Calado medio	8.007	M
Trimado	0.108	M
LOA en FL	187.756	M
B	44.878	M
Área mojada	9738.992	M3
Sección de obra viva	7829.687	M2
Cp	0.759	
Cb	0.750	
Cm	0.989	
Cfl	0.929	
LCB	98.264	M
LCG	87.789	M
KB	4.372	M
KG	7.695	M
BMt	24.971	M
BML	398.473	M
GMt	20.762	M

<b>GML</b>	394.265	M
<b>KMt</b>	29.342	M
<b>KML</b>	402.845	M
<b>MTc</b>	80.254	t/cm

Tabla 82, equilibrio hidrostático al calado mínimo

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
<b>GZ (m)</b>	0,000	3,534	6,019	6,846	6,971	6,635	5,653	4,180
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,0000	18,10	67,17	132,551	201,97	270,47	332,44	381,86
<b>Desplazamiento(t)</b>	51706	51702	51702	51706	51702	51702	51702	51702
<b>Calado en proa(m)</b>	7,945	8,020	8,440	8,654	8,092	7,149	5,310	1,198
<b>Calado en popa(m)</b>	8,060	7,860	7,628	7,726	7,822	7,439	7,615	9,530
<b>Calado medio(m)</b>	8,003	7,940	8,034	8,190	7,957	7,294	6,462	5,364
<b>Cp</b>	0,759	0,764	0,737	0,684	0,635	0,602	0,578	0,561
<b>Cb</b>	0,750	0,538	0,404	0,360	0,354	0,356	0,416	0,431
<b>Cm</b>	0,989	0,703	0,553	0,533	0,568	0,666	0,753	0,834
<b>Cfl</b>	0,929	0,891	0,691	0,579	0,540	0,510	0,532	0,531
<b>LCB (m)</b>	98,245	98,253	98,275	98,278	98,259	98,242	98,183	98,094
<b>LCF (m)</b>	87,786	91,075	96,629	102,207	105,846	107,961	112,428	112,894
<b>Trimado(º)</b>	0,0351	-0,0491	-0,2496	-0,2851	-0,0829	0,0890	0,7078	2,5566

Tabla 83, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante

## Salida de puerto con lastre

### Equilibrio hidrostático

<b>Calado</b>	9.122	M
<b>Desplazamiento</b>	60688	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	9.122	M
<b>Calado en popa</b>	9.122	M
<b>Calado medio</b>	9.122	M
<b>Trimado</b>	0.000	M
<b>LOA en FL</b>	188.529	M
<b>B</b>	44.881	M
<b>Área mojada</b>	10234.814	M3
<b>Sección de obra viva</b>	7894.767	M2
<b>Cp</b>	0.777	
<b>Cb</b>	0.767	
<b>Cm</b>	0.990	
<b>Cfl</b>	0.933	
<b>LCB</b>	96.932	M
<b>LCG</b>	88.137	M
<b>KB</b>	4.993	M
<b>KG</b>	7.557	M
<b>BMt</b>	21.541	M
<b>BML</b>	347.758	M
<b>GMt</b>	18.171	M
<b>GML</b>	344.388	M
<b>KMt</b>	26.534	M



<b>KML</b>	352.750	M
<b>MTc</b>	80.921	t/cm

Tabla 84, valores hidrostáticos al calado de diseño

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
<b>GZ (m)</b>	0,000	3,107	4,796	5,768	6,226	6,015	5,120	3,974
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,00	16,36	56,900	110,111	170,561	232,387	288,459	334,040
<b>Desplazamiento(t)</b>	60693	60693	60693	60693	60693	60693	60693	60693
<b>Calado en proa(m)</b>	9,155	9,163	9,609	9,904	9,588	8,899	7,272	4,143
<b>Calado en popa(m)</b>	9,096	9,048	9,621	10,898	12,399	14,525	19,182	28,054
<b>Calado medio(m)</b>	9,126	9,105	9,615	10,401	10,993	11,712	13,227	16,098
<b>Cp</b>	0,777	0,780	0,742	0,689	0,646	0,620	0,603	0,587
<b>Cb</b>	0,765	0,570	0,422	0,354	0,350	0,356	0,406	0,414
<b>Cm</b>	0,990	0,786	0,575	0,532	0,601	0,693	0,774	0,849
<b>Cfl</b>	0,933	0,862	0,644	0,545	0,520	0,481	0,531	0,532
<b>LCB (m)</b>	97,037	97,038	97,036	97,014	96,964	96,893	96,790	96,661
<b>LCF (m)</b>	88,150	90,343	97,445	103,458	106,545	111,444	112,699	113,452

Tabla 85, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante

## Llegada a puerto con lastre

### Equilibrio hidrostático

Calado	9.212	M
Desplazamiento	61415	T
Escora	0.0	º
Calado en proa	9.212	M
Calado en popa	9.212	M
Calado medio	9.212	M
Trimado	0.000	M
LOA en FL	188.588	M
B	44.881	M
Área mojada	10273.955	M3
Sección de obra viva	7898.419	M2
Cp	0.778	
Cb	0.768	
Cm	0.990	
Cfl	0.933	
LCB	96.828	M
LCG	88.178	M
KB	5.042	M
KG	7.532	M
BMt	21.297	M
BML	344.105	M
GMt	17.186	M
GML	339.994	M
KMt	26.339	M
KML	349.147	M

<b>MTc</b>	<b>80.959</b>	<b>t/cm</b>
------------	---------------	-------------

**Tabla 86, valores hidrostáticos obtenidos**

**Large angle stability**

<b>Grados de escora</b>	<b>0,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>40,0</b>	<b>50,0</b>	<b>60,0</b>	<b>70,0</b>
<b>GZ (m)</b>	-0,005	2,923	4,406	5,197	5,500	5,097	4,061	2,805
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	-0,009	15,439	53,109	101,477	155,461	209,067	255,208	289,632
<b>Desplazamiento(t)</b>	61420	61420	61420	61420	61420	61420	61420	61420
<b>Calado en proa(m)</b>	9,208	9,212	9,647	9,931	9,616	8,877	7,230	4,034
<b>Calado en popa(m)</b>	9,217	9,188	9,846	11,238	12,880	15,349	20,395	30,039
<b>Calado medio(m)</b>	9,212	9,200	9,746	10,584	11,248	12,113	13,813	17,036
<b>Cp</b>	0,778	0,782	0,745	0,692	0,649	0,624	0,606	0,591
<b>Cb</b>	0,769	0,572	0,423	0,353	0,344	0,390	0,404	0,410
<b>Cm</b>	0,990	0,798	0,576	0,532	0,603	0,695	0,775	0,850
<b>Cfl</b>	0,933	0,855	0,640	0,543	0,512	0,527	0,531	0,532
<b>LCB (m)</b>	96,808	96,809	96,804	96,775	96,715	96,630	96,521	96,368
<b>LCF (m)</b>	88,176	90,366	97,529	103,533	106,537	111,580	112,694	113,446
<b>Trimado(º)</b>	0,0028	-0,0074	0,0613	0,4013	1,0019	1,9864	4,0356	7,9339

**Tabla 87, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante.**

## Salida de puerto con módulo de grúas

### Equilibrio hidrostático

<b>Calado</b>	9.203	M
<b>Desplazamiento</b>	61343	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	9.203	M
<b>Calado en popa</b>	9.203	M
<b>Calado medio</b>	9.203	M
<b>Trimado</b>	0.000	M
<b>LOA en FL</b>	188.582	M
<b>B</b>	44.881	M
<b>Área mojada</b>	10270.072	M3
<b>Sección de obra viva</b>	7898.056	M2
<b>Cp</b>	0.778	
<b>Cb</b>	0.768	
<b>Cm</b>	0.990	
<b>Cfl</b>	0.933	
<b>LCB</b>	96.838	M
<b>LCG</b>	88.174	M
<b>KB</b>	5.037	M
<b>KG</b>	13.987	M
<b>BMt</b>	21.321	M
<b>BML</b>	344.464	M
<b>GMt</b>	11.560	M
<b>GML</b>	334.703	M
<b>KMt</b>	26.358	M

<b>KML</b>	349.501	M
<b>MTc</b>	80.955	t/cm

Tabla 88, valores hidrostáticos obtenidos

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
<b>GZ (m)</b>	0,074	2,025	2,563	2,457	1,943	0,836	-0,780	-2,466
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,1354	11,3360	35,2681	60,6682	83,0838	97,4966	98,0157	81,7530
<b>Desplazamiento(t)</b>	61344	61344	61344	61344	61344	61344	61344	61344
<b>Calado en proa(m)</b>	9,227	9,234	9,674	9,953	9,626	8,878	7,207	4,010
<b>Calado en popa(m)</b>	9,184	9,150	9,791	11,174	12,813	15,265	20,305	29,880
<b>Calado medio(m)</b>	9,205	9,192	9,733	10,563	11,220	12,071	13,756	16,945
<b>Cp</b>	0,778	0,781	0,743	0,691	0,648	0,623	0,606	0,591
<b>Cb</b>	0,767	0,572	0,423	0,353	0,345	0,391	0,405	0,410
<b>Cm</b>	0,990	0,797	0,576	0,532	0,603	0,695	0,775	0,850
<b>Cfl</b>	0,933	0,856	0,640	0,543	0,513	0,527	0,531	0,532
<b>LCB (m)</b>	96,914	96,917	96,907	96,853	96,764	96,655	96,525	96,379
<b>LCF (m)</b>	88,183	90,351	97,519	103,552	106,538	111,581	112,692	113,441
<b>Trimado(º)</b>	-0,0132	-0,0258	0,0360	0,3750	0,9784	1,9604	4,0151	7,8930

Tabla 89, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante

## Llegada a puerto con módulo de grúas

### Equilibrio hidrostático

<b>Calado</b>	9.058	M
<b>Desplazamiento</b>	60173	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	9.058	M
<b>Calado en popa</b>	9.058	M
<b>Calado medio</b>	9.058	M
<b>Trimado</b>	0.000	M
<b>LOA en FL</b>	188.487	M
<b>B</b>	44.881	M
<b>Área mojada</b>	10207.054	M3
<b>Sección de obra viva</b>	7892.176	M2
<b>Cp</b>	0.776	
<b>Cb</b>	0.766	
<b>Cm</b>	0.990	
<b>Cfl</b>	0.933	
<b>LCB</b>	97.007	M
<b>LCG</b>	88.109	M
<b>KB</b>	4.958	M
<b>KG</b>	14.012	M
<b>BMt</b>	21.718	M
<b>BML</b>	350.401	M
<b>GMt</b>	11.832	M
<b>GML</b>	340.515	M
<b>KMt</b>	26.675	M

<b>KML</b>	355.358	M
<b>MTc</b>	80.895	t/cm

**Tabla 90, valores hidrostáticos obtenidos**

**Large angle stability**

<b>Grados de escora</b>	<b>0,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>40,0</b>	<b>50,0</b>	<b>60,0</b>	<b>70,0</b>
<b>GZ (m)</b>	-0,005	2,009	2,639	2,529	1,987	0,906	-0,728	-2,438
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	-0,009	10,823	35,0886	61,309	84,259	99,2455	100,495	84,548
<b>Desplazamiento(t)</b>	60177	60177	60178	60177	60177	60177	60177	60177
<b>Calado en proa(m)</b>	9,067	9,075	9,516	9,793	9,432	8,689	6,954	3,629
<b>Calado en popa(m)</b>	9,052	8,996	9,529	10,762	12,221	14,245	18,803	27,478
<b>Calado medio(m)</b>	9,060	9,035	9,522	10,277	10,827	11,467	12,878	15,553
<b>Cp</b>	0,776	0,780	0,743	0,691	0,647	0,621	0,603	0,588
<b>Cb</b>	0,766	0,568	0,421	0,355	0,352	0,356	0,406	0,414
<b>Cm</b>	0,990	0,777	0,573	0,532	0,599	0,691	0,773	0,848
<b>Cfl</b>	0,933	0,867	0,647	0,547	0,523	0,482	0,532	0,532
<b>LCB (m)</b>	97,032	97,036	97,031	96,986	96,901	96,806	96,677	96,532
<b>LCF (m)</b>	88,112	90,350	97,387	103,306	106,376	111,274	112,671	113,434
<b>Trimado(º)</b>	-0,004	-0,024	0,0039	0,2973	0,8561	1,7056	3,6333	7,2833

**Tabla 91, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Salida de puerto con FPSO

### Equilibrio hidrostático

<b>Calado</b>	9.038	M
<b>Desplazamiento</b>	60012	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	9.038	M
<b>Calado en popa</b>	9.038	M
<b>Calado medio</b>	9.038	M
<b>Trimado</b>	0.000	M
<b>LOA en FL</b>	188.474	M
<b>B</b>	44.880	M
<b>Área mojada</b>	10198.416	M3
<b>Sección de obra viva</b>	7891.370	M2
<b>Cp</b>	0.776	
<b>Cb</b>	0.766	
<b>Cm</b>	0.990	
<b>Cfl</b>	0.933	
<b>LCB</b>	97.031	M
<b>LCG</b>	88.100	M
<b>KB</b>	4.947	M
<b>KG</b>	19.127	M
<b>BMt</b>	21.773	M
<b>BML</b>	351.232	M
<b>GMt</b>	7.267	M
<b>GML</b>	336.727	M
<b>KMt</b>	26.720	M



<b>KML</b>	356.179	M
<b>MTc</b>	80.887	t/cm
	1082.942	

**Tabla 92, valores hidrostáticos obtenidos**

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
<b>GZ (m)</b>	0,003	1,399	1,438	0,760	-0,303	-1,824	-3,824	-5,804
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,0052	7,7976	22,950	34,323	36,939	26,743	-1,289	-49,552
<b>Desplazamiento(t)</b>	60012	60012	60012	60012	60012	60012	60012	60012
<b>Calado en proa(m)</b>	9,093	9,105	9,558	9,840	9,480	8,761	7,043	3,809
<b>Calado en popa(m)</b>	8,994	8,929	9,427	10,624	12,046	13,969	18,416	26,807
<b>Calado medio(m)</b>	9,043	9,017	9,493	10,232	10,763	11,365	12,729	15,308
<b>Cp</b>	0,775	0,778	0,740	0,688	0,645	0,619	0,602	0,586
<b>Cb</b>	0,762	0,567	0,420	0,355	0,354	0,357	0,406	0,415
<b>Cm</b>	0,990	0,776	0,573	0,532	0,599	0,691	0,773	0,848
<b>Cfl</b>	0,933	0,869	0,648	0,547	0,526	0,483	0,532	0,532
<b>LCB (m)</b>	97,214	97,219	97,216	97,158	97,056	96,952	96,810	96,689
<b>LCF (m)</b>	88,121	90,332	97,373	103,345	106,411	111,111	112,680	113,386
<b>Trimado(º)</b>	-0,0302	-0,0538	-0,0400	0,2408	0,7876	1,5986	3,4878	7,0261

**Tabla 93, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

### Salida de puerto con mala mar

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
<b>GZ (m)</b>	0,003	1,461	1,961	1,328	0,201	-1,616	-3,657	-5,654
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,0052	7,7696	25,9062	42,9865	51,0944	44,4671	18,1283	-28,5240
<b>Desplazamiento(t)</b>	60012	60012	60011	60012	60016	60012	60012	60012
<b>Calado en proa(m)</b>	10,230	10,120	9,965	9,667	8,966	7,652	5,417	1,278
<b>Calado en popa(m)</b>	8,465	8,627	9,597	11,073	12,609	15,516	20,576	30,059

<b>Calado medio(m)</b>	9,348	9,374	9,781	10,370	10,788	11,584	12,996	15,669
<b>Cp</b>	0,672	0,675	0,669	0,648	0,628	0,613	0,598	0,584
<b>Cb</b>	0,575	0,511	0,397	0,347	0,336	0,382	0,378	0,369
<b>Cm</b>	0,986	0,757	0,594	0,588	0,605	0,693	0,772	0,846
<b>Cfl</b>	0,944	0,883	0,677	0,547	0,489	0,532	0,535	0,536
<b>LCB (m)</b>	97,333	97,314	97,243	97,114	96,997	96,844	96,658	96,540
<b>LCF (m)</b>	89,528	92,973	99,075	104,966	107,873	111,967	113,003	113,867
<b>Trimado(º)</b>	-0,541	-0,458	-0,1129	0,4318	1,1182	2,4133	4,6446	8,7682

**Tabla 94, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Llegada a puerto con FPSO

### Equilibrio hidrostático

<b>Calado</b>	9.109	M
<b>Desplazamiento</b>	60588	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	9.109	M
<b>Calado en popa</b>	9.109	M
<b>Calado medio</b>	9.109	M
<b>Trimado</b>	0.000	M
<b>LOA en FL</b>	188.521	M
<b>B</b>	44.881	M
<b>Área mojada</b>	10229.449	M3
<b>Sección de obra viva</b>	7894.266	M2
<b>Cp</b>	0.777	
<b>Cb</b>	0.767	
<b>Cm</b>	0.990	
<b>Cfl</b>	0.933	
<b>LCB</b>	96.946	M
<b>LCG</b>	88.132	M
<b>KB</b>	4.986	M
<b>KG</b>	17.687	M
<b>BMt</b>	21.575	M
<b>BML</b>	348.265	M
<b>GMt</b>	8.187	M
<b>GML</b>	334.877	M
<b>KMt</b>	26.561	M

<b>KML</b>	353.251	M
<b>MTc</b>	80.916	t/cm

**Tabla 95, valores hidrostáticos obtenidos**

**Large angle stability**

<b>Grados de escora</b>	<b>0,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>30,0</b>	<b>40,0</b>	<b>50,0</b>	<b>60,0</b>	<b>70,0</b>
<b>GZ (m)</b>	-0,005	1,372	1,375	0,711	-0,326	-1,846	-3,826	-5,784
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	-0,008	7,640	22,360	33,105	35,372	24,967	-3,200	-51,370
<b>Desplazamiento(t)</b>	60588	60588	60589	60588	60588	60588	60588	60588
<b>Calado en proa(m)</b>	9,163	9,174	9,624	9,905	9,559	8,831	7,133	3,910
<b>Calado en popa(m)</b>	9,066	9,013	9,568	10,844	12,359	14,501	19,207	28,117
<b>Calado medio(m)</b>	9,115	9,093	9,596	10,374	10,959	11,666	13,170	16,014
<b>Cp</b>	0,776	0,779	0,741	0,689	0,646	0,621	0,603	0,588
<b>Cb</b>	0,763	0,569	0,421	0,354	0,350	0,356	0,406	0,414
<b>Cm</b>	0,990	0,786	0,575	0,532	0,601	0,693	0,774	0,849
<b>Cfl</b>	0,933	0,863	0,645	0,545	0,521	0,481	0,531	0,532
<b>LCB (m)</b>	97,125	97,130	97,122	97,060	96,956	96,844	96,702	96,561
<b>LCF (m)</b>	88,153	90,333	97,435	103,452	106,539	111,425	112,687	113,411
<b>Trimado(º)</b>	-0,0299	-0,0496	-0,0173	0,2882	0,8596	1,7404	3,7021	7,3916

**Tabla 96, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Calado al puntal con lastre

### Equilibrio hidrostático

<b>Calado</b>	12.468	M
<b>Desplazamiento</b>	88003	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	12.449	M
<b>Calado en popa</b>	12.486	M
<b>Calado medio</b>	12.469	M
<b>Trimado</b>	0.037	M
<b>LOA en FL</b>	190.466	M
<b>B</b>	44.897	M
<b>Área mojada</b>	11500.549	M3
<b>Sección de obra viva</b>	8026.380	M2
<b>Cp</b>	0.813	
<b>Cb</b>	0.806	
<b>Cm</b>	0.992	
<b>Cfl</b>	0.939	
<b>LCB</b>	94.379	M
<b>LCG</b>	89.579	M
<b>KB</b>	6.795	M
<b>KG</b>	7.796	M
<b>BMt</b>	15.136	M
<b>BML</b>	251.630	M
<b>GMt</b>	12.466	M
<b>GML</b>	248.959	M
<b>KMt</b>	21.932	M

<b>KML</b>	258.425	M
<b>MTc</b>	82.270	t/cm

**Tabla 97, valores hidrostáticos obtenidos**

**Large angle stability**

<b>Grados de escora</b>	<b>0.0</b>	<b>10.0</b>	<b>20.0</b>	<b>30.0</b>	<b>40.0</b>	<b>50.0</b>	<b>60.0</b>
<b>GZ (m)</b>	0.000	0.432	0.923	1.490	1.465	1.250	0.937
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0.0001	2.1507	8.7769	21.0961	36.2777	49.9213	60.8978
<b>Desplazamiento(t)</b>	88016	88010	88010	88010	88010	88010	88011
<b>Calado en proa(m)</b>	12.487	12.833	12.986	12.971	12.736	12.746	13.136
<b>Calado en popa(m)</b>	12.458	15.417	18.833	23.037	30.298	40.093	54.445
<b>Calado medio(m)</b>	12.472	14.125	15.910	18.004	21.517	26.419	33.791
<b>Cp</b>	0.813	0.764	0.719	0.686	0.675	0.690	0.675
<b>Cb</b>	0.804	0.566	0.416	0.357	0.359	0.381	0.377
<b>Cm</b>	0.992	0.800	0.662	0.628	0.682	0.755	0.825
<b>Cfl</b>	0.939	0.366	0.364	0.379	0.415	0.473	0.510
<b>LCB (m)</b>	94.466	94.435	94.391	94.325	94.231	94.133	94.056
<b>LCF (m)</b>	89.594	116.839	118.124	120.712	122.084	119.817	116.585
<b>Trimado(º)</b>	-0.009	0.7934	1.7947	3.0877	5.3767	8.3378	12.4828

**Tabla 98, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Calado al puntal con carga

### Equilibrio hidrostático con carga puntual sobre cubierta

<b>Calado</b>	12.522	M
<b>Desplazamiento</b>	88249	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	12.493	M
<b>Calado en popa</b>	12.550	M
<b>Calado medio</b>	12.509	M
<b>Trimado</b>	0.057	M
<b>LOA en FL</b>	182.532	M
<b>B</b>	44.878	M
<b>Área mojada</b>	18054.215	M3
<b>Sección de obra viva</b>	1653.640	M2
<b>Cp</b>	0.849	
<b>Cb</b>	0.841	
<b>Cm</b>	0.990	
<b>Cfl</b>	0.202	
<b>LCB</b>	94.409	M
<b>LCG</b>	138.546	M
<b>KB</b>	6.811	M
<b>KG</b>	14.498	M
<b>BMt</b>	3.258	M
<b>BML</b>	62.377	M
<b>GMt</b>	-5.408	M
<b>GML</b>	53.711	M
<b>KMt</b>	10.069	M

<b>KML</b>	69.188	M
<b>MTc</b>	16.950	t/cm

**Tabla 99, valores hidrostáticos obtenidos**

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
<b>GZ (m)</b>	0,000	0,092	-0,013	0,049	-0,447	-1,141	-1,872	-2,524
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,0001	0,6411	0,9732	1,3048	-0,2691	-8,1646	-23,249	-45,307
<b>Desplazamiento(t)</b>	85630	85637	85637	85635	85637	85637	85637	85637
<b>Calado en proa(m)</b>	12,151	12,476	12,628	12,634	12,318	12,100	12,127	12,777
<b>Calado en popa(m)</b>	12,206	14,323	17,608	21,592	28,466	37,922	51,832	76,529
<b>Calado medio(m)</b>	12,178	13,400	15,118	17,113	20,392	25,011	31,980	44,653
<b>Cp</b>	0,811	0,774	0,728	0,692	0,679	0,665	0,672	0,661
<b>Cb</b>	0,804	0,580	0,423	0,341	0,361	0,370	0,376	0,377
<b>Cm</b>	0,992	0,793	0,654	0,608	0,672	0,749	0,820	0,884
<b>Cfl</b>	0,938	0,445	0,402	0,394	0,446	0,480	0,528	0,575
<b>LCB (m)</b>	94,485	94,432	94,327	94,238	94,063	93,932	93,874	93,842
<b>LCF (m)</b>	89,447	107,692	112,875	115,936	118,423	116,725	114,006	108,565
<b>Trimado(º)</b>	0,0171	0,5671	1,5286	2,7483	4,9460	7,8787	12,0123	18,8628

**Tabla 100, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**



**Large angle stability con carga aportando flotabilidad**

Grados de escora	0,0	5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0
<b>GZ (m)</b>	0,000	0,410	0,812	1,717	2,575	3,052	3,476	4,343
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,000	1,0321	4,0656	16,662	38,331	66,730	99,134	137,946
<b>Desplazamiento(t)</b>	88019	88010	88018	88017	88018	88018	88018	88018
<b>Calado en proa(m)</b>	12,488	12,596	12,645	12,619	12,558	12,258	11,600	10,056
<b>Calado en popa(m)</b>	12,458	13,512	14,699	17,227	20,574	25,796	32,596	41,158
<b>Calado medio(m)</b>	12,473	13,054	13,672	14,923	16,566	19,027	22,098	25,607
<b>Cp</b>	0,813	0,799	0,782	0,753	0,703	0,622	0,534	0,465
<b>Cb</b>	0,804	0,685	0,585	0,439	0,346	0,296	0,219	0,227
<b>Cm</b>	0,992	0,886	0,796	0,652	0,569	0,494	0,428	0,528
<b>Cfl</b>	0,939	0,466	0,461	0,454	0,431	0,408	0,331	0,344
<b>LCB (m)</b>	94,466	94,462	94,446	94,411	94,350	94,272	94,142	94,033
<b>LCF (m)</b>	89,594	108,008	108,978	109,729	110,840	111,515	107,975	108,303
<b>Trimado(º)</b>	-0,009	0,2812	0,6306	1,4146	2,4599	4,1494	6,4200	9,4628

**Tabla 101, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Calado máximo sumergido

### Equilibrio hidrostático con buque en lastre

<b>Calado</b>	21.197	M
<b>Desplazamiento</b>	103159	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	21.244	M
<b>Calado en popa</b>	21.151	M
<b>Calado medio</b>	21.223	M
<b>Trimado</b>	-0.092	M
<b>LOA en FL</b>	186.985	M
<b>B</b>	44.881	M
<b>Área mojada</b>	19509.138	M3
<b>Sección de obra viva</b>	1766.826	M2
<b>Cp</b>	0.571	
<b>Cb</b>	0.565	
<b>Cm</b>	0.993	
<b>Cfl</b>	0.211	
<b>LCB</b>	101.872	M
<b>LCG</b>	148.531	M
<b>KB</b>	8.287	M
<b>KG</b>	8.930	M
<b>BMt</b>	2.890	M
<b>BML</b>	51.891	M
<b>GMt</b>	1.283	M
<b>GML</b>	50.284	M
<b>KMt</b>	11.177	M

<b>KML</b>	60.178	M
<b>MTc</b>	18.110	t/cm

**Tabla 102, valores hidrostáticos obtenidos**

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0
<b>GZ (m)</b>	0,000	0,242	0,364	0,412	0,237	0,050	-0,118
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,0000	1,2849	4,3808	8,3988	11,7601	13,1649	12,7994
<b>Desplazamiento(t)</b>	103160	103159	103154	103151	103151	103150	103151
<b>Calado en proa(m)</b>	21,154	21,136	21,627	22,959	25,022	28,642	35,249
<b>Calado en popa(m)</b>	21,481	21,468	21,561	24,002	30,533	39,064	51,668
<b>Calado medio(m)</b>	21,317	21,302	21,594	23,480	27,778	33,853	43,458
<b>Cp</b>	0,571	0,571	0,579	0,558	0,556	0,560	0,582
<b>Cb</b>	0,563	0,499	0,426	0,569	0,527	0,483	0,466
<b>Cm</b>	0,993	0,882	1,026	1,043	1,018	0,952	0,898
<b>Cfl</b>	0,211	0,225	0,179	0,283	0,310	0,334	0,390
<b>LCB (m)</b>	101,755	101,763	101,767	101,746	101,720	101,704	101,681
<b>LCF (m)</b>	148,548	147,115	139,008	129,930	125,850	121,471	114,728
<b>Trimado(º)</b>	0,1004	0,1019	-0,0204	0,3201	1,6915	3,1965	5,0285

**Tabla 103, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

**Large Angle stability con carga aportando flotabilidad**

Grados de escora	0,0	5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0
<b>GZ (m)</b>	0,000	0,189	0,378	0,701	1,050	1,392	2,255	3,077
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,0001	0,4687	1,9062	7,2823	16,095	28,037	46,012	72,794
<b>Desplazamiento(t)</b>	107806	107806	107805	107804	107803	107801	107805	107806
<b>Calado en proa(m)</b>	20,159	20,187	20,175	20,411	21,494	23,009	25,341	29,327
<b>Calado en popa(m)</b>	20,323	20,611	20,977	21,567	23,503	27,844	32,898	41,442
<b>Calado medio(m)</b>	20,241	20,399	20,576	20,989	22,498	25,426	29,119	35,384
<b>Cp</b>	0,629	0,626	0,624	0,628	0,607	0,583	0,513	0,464
<b>Cb</b>	0,621	0,573	0,527	0,454	0,400	0,315	0,250	0,263
<b>Cm</b>	0,992	0,926	0,859	0,946	0,960	0,552	0,510	0,578
<b>Cfl</b>	0,319	0,290	0,302	0,280	0,321	0,317	0,321	0,347
<b>LCB (m)</b>	100,42	100,43	100,419	100,422	100,424	100,404	100,368	100,331
<b>LCF (m)</b>	129,66	133,00	131,43	124,94	115,72	109,76	104,79	103,14
<b>Trimado(º)</b>	0,0502	0,1303	0,2464	0,3549	0,6168	1,4842	2,3191	3,7148

**Tabla 104,,valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Anexo 4: Cálculos de estabilidad en avería

### Avería en el castillo de proa

Calado máximo sumergido con lastre

<b>Calado</b>	21,231	M
<b>Desplazamiento</b>	101451	T
<b>Escora</b>	-1,2	º
<b>Calado en proa</b>	21,075	M
<b>Calado en popa</b>	21,387	M
<b>Calado medio</b>	21,150	M
<b>Trimado</b>	0,312	M
<b>LOA en FL</b>	186,953	M
<b>B</b>	44,890	M
<b>Área mojada</b>	19509,761	M3
<b>Sección de obra viva</b>	1429,911	M2
<b>Cp</b>	0,564	
<b>Cb</b>	0,547	
<b>Cm</b>	0,979	
<b>Cfl</b>	0,170	
<b>LCB</b>	100,836	M
<b>LCG</b>	146,120	M
<b>KB</b>	8,143	M
<b>KG</b>	9,723	M
<b>BMt</b>	2,322	M
<b>BML</b>	52,503	M
<b>GMt</b>	0,742	M
<b>GML</b>	50,923	M

<b>KMt</b>	10,465	M
<b>KML</b>	60,636	M
<b>MTc</b>	14,657	t/cm

**Tabla 105, valores hidrostáticos obtenidos**

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
<b>GZ (m)</b>	0,009	0,199	0,283	0,292	0,106	-0,083	-0,251	-0,361
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0,0164	1,1006	3,5713	6,5726	8,6594	8,7415	7,0439	3,9290
<b>Desplazamiento(t)</b>	101449	101449	101451	101449	101449	101448	101449	101449
<b>Calado en proa(m)</b>	21,124	21,359	22,154	23,720	25,963	29,815	36,769	51,540
<b>Calado en popa(m)</b>	21,478	21,612	21,736	23,941	30,360	38,749	51,173	73,499
<b>Calado medio(m)</b>	21,301	21,486	21,945	23,831	28,161	34,282	43,971	62,520
<b>Cp</b>	0,562	0,557	0,561	0,540	0,539	0,539	0,548	0,546
<b>Cb</b>	0,554	0,488	0,413	0,579	0,539	0,492	0,454	0,456
<b>Cm</b>	0,993	0,907	1,067	1,085	1,060	0,993	0,916	0,926
<b>Cfl</b>	0,189	0,201	0,165	0,269	0,304	0,330	0,370	0,452
<b>LCB (m)</b>	100,814	100,816	100,835	100,82	100,795	100,78	100,76	100,75
<b>LCF (m)</b>	147,499	146,014	137,229	129,44	125,16	120,39	114,594	104,21
<b>Trimado(º)</b>	0,1089	0,0777	-0,1285	0,0680	1,3499	2,7409	4,4140	6,7117

**Tabla 106, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

**Calado máximo sumergido con carga**

<b>Calado</b>	20.184	M
<b>Desplazamiento</b>	106834	T
<b>Escora</b>	-0.8	º
<b>Calado en proa</b>	20.039	M
<b>Calado en popa</b>	20.330	M
<b>Calado medio</b>	20.137	M
<b>Trimado</b>	0.292	M
<b>LOA en FL</b>	186.465	M
<b>B</b>	44.885	M
<b>Área mojada</b>	21864.540	M3
<b>Sección de obra viva</b>	2488.639	M2
<b>Cp</b>	0.626	
<b>Cb</b>	0.611	
<b>Cm</b>	0.983	
<b>Cfl</b>	0.297	
<b>LCB</b>	99.913	M
<b>LCG</b>	127.536	M
<b>KB</b>	8.488	M
<b>KG</b>	10.114	M
<b>BMt</b>	3.861	M
<b>BML</b>	68.549	M
<b>GMt</b>	2.235	M
<b>GML</b>	66.923	M
<b>KMt</b>	12.349	M
<b>KML</b>	77.031	M
<b>MTc</b>	25.509	t/cm

**Tabla 107, valores hidrostáticos obtenidos**

Large angle stability

Grados de escora	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	40.0
GZ (m)	0.031	0.199	0.363	0.529	0.662	0.829	1.005	1.352
Área bajo Gz (m*º)	0.0281	0.5779	1.9795	4.2195	7.197	10.90	15.49	27.201
Desplazamiento(t)	106832	106832	106834	106833	106833	106833	106832	106832
Calado en proa(m)	20.060	20.155	20.241	20.347	20.60	21.11	21.71	23.295
Calado en popa(m)	20.310	20.616	20.974	21.266	21.54	22.00	23.43	27.717
Calado medio(m)	20.185	20.385	20.607	20.806	21.07	21.56	22.57	25.506
Cp	0.626	0.621	0.617	0.615	0.619	0.596	0.598	0.576
Cb	0.617	0.568	0.521	0.489	0.448	0.391	0.396	0.312
Cm	0.992	0.925	0.859	0.911	0.957	0.973	0.970	0.552
Cfl	0.296	0.265	0.277	0.277	0.263	0.266	0.305	0.304
LCB (m)	99.922	99.913	99.901	99.911	99.89	99.90	99.89	99.893
LCF (m)	127.54	130.68	129.15	126.58	122.8	114.8	113.5	107.56
Trimado(º)	0.0768	0.1413	0.2250	0.2823	0.290	0.274	0.528	1.3576

Tabla 108, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante

Calado puntal con carga

Large angle stability

Grados de escora	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
GZ (m)	0.000	0.730	1.555	2.324	2.789	3.263	4.168
Área bajo Gz (m*º)	-0.0005	3.6306	14.9881	34.5671	60.3549	90.2751	127.4755
Desplazamiento(t)	88015	88018	88018	88018	88018	88018	88019
Calado en proa(m)	12.484	12.878	13.065	13.270	13.257	12.970	11.922
Calado en popa(m)	12.460	14.614	17.074	20.330	25.393	31.966	40.316
Calado medio(m)	12.472	13.746	15.070	16.800	19.325	22.468	26.119
Cp	0.813	0.771	0.734	0.697	0.617	0.529	0.461
Cb	0.804	0.584	0.439	0.343	0.295	0.219	0.229
Cm	0.992	0.798	0.658	0.571	0.495	0.429	0.529



<b>Cfl</b>	0.939	0.447	0.434	0.409	0.392	0.321	0.331
<b>LCB (m)</b>	94.458	94.455	94.418	94.360	94.281	94.197	94.078
<b>LCF (m)</b>	89.593	107.347	107.940	108.568	109.634	106.461	106.627
<b>Trimado(º)</b>	-0.0072	0.5330	1.2308	2.1670	3.7211	5.8128	8.6521

**Tabla 109, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Avería en casing de popa

Calado máximo sumergido con lastre

<b>Calado</b>	24,167	M
<b>Desplazamiento</b>	102368	T
<b>Escora</b>	11,1	º
<b>Calado en proa</b>	20,296	M
<b>Calado en popa</b>	28,037	M
<b>Calado medio</b>	21,650	M
<b>Trimado</b>	7,740	M
<b>LOA en FL</b>	186,676	M
<b>B</b>	44,801	M
<b>Área mojada</b>	19989,853	M3
<b>Sección de obra viva</b>	1613,604	M2
<b>Cp</b>	0,553	
<b>Cb</b>	0,417	
<b>Cm</b>	0,990	
<b>Cfl</b>	0,193	
<b>LCB</b>	102,347	M
<b>LCG</b>	158,269	M
<b>KB</b>	8,281	M
<b>KG</b>	9,845	M
<b>BMt</b>	2,143	M
<b>BML</b>	27,440	M
<b>GMt</b>	0,550	M
<b>GML</b>	25,848	M
<b>KMt</b>	10,382	M

<b>KML</b>	35,190	M
<b>MTc</b>	16,539	t/cm

**Tabla 110, valores hidrostáticos obtenido**

### Large angle stability

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0
<b>GZ (m)</b>	-0,078	0,070	0,021	-0,130	-0,283	-0,408
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	-0,1414	0,0664	0,6757	0,1639	-1,9161	-5,4015
<b>Desplazamiento(t)</b>	102369	102370	102360	102371	102373	102364
<b>Calado en proa(m)</b>	20,898	20,602	20,594	21,353	23,054	26,321
<b>Calado en popa(m)</b>	23,373	25,622	29,655	34,278	40,168	48,218
<b>Calado medio(m)</b>	22,136	23,112	25,125	27,816	31,611	37,270
<b>Cp</b>	0,562	0,558	0,561	0,566	0,570	0,573
<b>Cb</b>	0,529	0,447	0,515	0,513	0,486	0,449
<b>Cm</b>	0,993	0,932	1,100	1,099	1,040	0,953
<b>Cfl</b>	0,180	0,172	0,187	0,180	0,204	0,232
<b>LCB (m)</b>	102,371	102,382	102,346	102,325	102,297	102,285
<b>LCF (m)</b>	170,533	182,075	181,783	176,825	165,481	153,431
<b>Trimado(º)</b>	0,7598	1,5409	2,7798	3,9622	5,2400	6,6929

**Tabla 111, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

**Calado máximo sumergido con carga**

**Large angle stability**

Grados de escora	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	40.0
<b>GZ (m)</b>	-0.036	0.078	0.214	0.334	0.413	0.499	0.610	0.978
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	-0.0329	0.1082	0.8301	2.2171	4.0922	6.3647	9.1237	16.8860
<b>Desplazamiento(t)</b>	107021	107025	107024	107024	107023	107014	107028	107024
<b>Calado en proa(m)</b>	20.030	19.871	19.682	19.480	19.405	19.574	19.982	21.461
<b>Calado en popa(m)</b>	20.836	22.025	23.062	24.202	25.402	26.435	27.802	31.491
<b>Calado medio(m)</b>	20.433	20.948	21.372	21.841	22.403	23.005	23.892	26.476
<b>Cp</b>	0.625	0.621	0.620	0.621	0.626	0.632	0.618	0.563
<b>Cb</b>	0.609	0.548	0.497	0.459	0.438	0.428	0.386	0.286
<b>Cm</b>	0.992	0.926	0.859	0.901	0.943	0.949	0.644	0.516
<b>Cfl</b>	0.267	0.267	0.269	0.270	0.268	0.265	0.278	0.273
<b>LCB (m)</b>	101.02	101.03	101.01	101.02	101.00	100.98	100.97	100.96
<b>LCF (m)</b>	146.426	144.717	146.180	142.63	138.871	138.608	132.85	121.20
<b>Trimado(º)</b>	0.2476	0.6613	1.0377	1.449	1.8409	2.1058	2.3996	3.0767

**Tabla 112, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

**Calado al puntal lastre**

**Large angle stability**

Grados de escora	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0
GZ (m)	0,000	0,111	0,217	0,329	0,366	0,303	0,185
Área bajo Gz (m*º)	-0,0019	0,7230	2,3143	5,0829	8,6429	12,0568	14,5281
Desplazamiento(t)	88012	88012	88011	88012	88011	88011	88003
Calado en proa(m)	12,491	12,338	11,849	10,979	10,288	9,963	9,938
Calado en popa(m)	12,453	17,018	22,592	29,695	38,272	48,982	64,420
Calado medio(m)	12,472	14,678	17,220	20,337	24,280	29,472	37,179
Cp	0,813	0,803	0,761	0,730	0,718	0,702	0,685
Cb	0,804	0,561	0,397	0,328	0,327	0,332	0,338
Cm	0,992	0,799	0,660	0,620	0,679	0,756	0,827
Cfl	0,939	0,289	0,271	0,284	0,328	0,373	0,400
LCB (m)	94,477	94,411	94,329	94,242	94,141	94,085	94,049
LCF (m)	89,595	138,789	145,194	145,671	143,006	139,428	137,842
Trimado(º)	-0,0115	1,4367	3,2948	5,7274	8,5291	11,8106	16,2764

**Tabla 113, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

**Calado al puntal con carga**

**Large angle stability**

<b>Grados de escora</b>	<b>0.0</b>	<b>10.0</b>	<b>20.0</b>	<b>30.0</b>	<b>40.0</b>	<b>50.0</b>	<b>60.0</b>
<b>GZ (m)</b>	0.000	0.542	1.129	1.608	2.087	2.730	3.702
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	-0.0017	2.7999	11.1503	24.9137	43.3462	67.1119	99.3691
<b>Desplazamiento(t)</b>	88017	88018	88019	88017	88019	88019	88017
<b>Calado en proa(m)</b>	12.488	12.255	11.800	11.193	10.516	9.585	7.449
<b>Calado en popa(m)</b>	12.457	15.709	19.388	24.236	30.096	37.122	47.055
<b>Calado medio(m)</b>	12.472	13.982	15.594	17.714	20.306	23.353	27.252
<b>Cp</b>	0.813	0.785	0.722	0.646	0.569	0.492	0.435
<b>Cb</b>	0.804	0.566	0.417	0.343	0.277	0.205	0.210
<b>Cm</b>	0.992	0.824	0.688	0.588	0.516	0.453	0.546
<b>Cfl</b>	0.939	0.404	0.380	0.384	0.362	0.315	0.337
<b>LCB (m)</b>	94.467	94.429	94.360	94.289	94.199	94.088	94.006
<b>LCF (m)</b>	89.594	118.497	121.978	124.982	120.327	113.161	110.261
<b>Trimado(º)</b>	-0.0093	1.0604	2.3287	3.9984	5.9901	8.3946	11.9832

**Tabla 114, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

## Avería en la sala de máquinas

### Calado máximo sumergido con carga

<b>Calado</b>	23.028	M
<b>Desplazamiento</b>	107796	T
<b>Escora</b>	0.0	º
<b>Calado en proa</b>	23.971	M
<b>Calado en popa</b>	22.084	M
<b>Calado medio</b>	22.969	M
<b>Trimado</b>	-1.887	M
<b>LOA en FL</b>	187.489	M
<b>B</b>	44.882	M
<b>Área mojada</b>	23334.446	M3
<b>Sección de obra viva</b>	467.777	M2
<b>Cp</b>	0.534	
<b>Cb</b>	0.526	
<b>Cm</b>	0.993	
<b>Cfl</b>	0.056	
<b>LCB</b>	100.442	M
<b>LCG</b>	91.795	M
<b>KB</b>	9.614	M
<b>KG</b>	10.185	M
<b>BMt</b>	1.476	M
<b>BML</b>	54.212	M
<b>GMt</b>	0.905	M
<b>GML</b>	53.641	M
<b>KMt</b>	11.090	M

<b>KML</b>	63.824	M
<b>MTc</b>	4.795	t/cm

**Tabla 115, valores hidrostáticos obtenidos**

**Large angle stability**

<b>Grados de escora</b>	<b>0.0</b>	<b>5.0</b>	<b>10.0</b>	<b>15.0</b>	<b>20.0</b>	<b>25.0</b>	<b>30.0</b>	<b>40.0</b>
<b>GZ (m)</b>	0.004	0.120	0.232	0.349	0.473	0.623	0.804	1.230
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0.0036	0.3129	1.1921	2.6408	4.6915	7.4167	10.977	20.917
<b>Desplazamiento(t)</b>	107800	107812	107803	107816	107814	107796	107803	107811
<b>Calado en proa(m)</b>	23.970	24.027	24.549	25.469	26.664	27.980	29.223	31.622
<b>Calado en popa(m)</b>	22.092	22.071	21.936	21.784	21.538	21.375	21.953	25.237
<b>Calado medio(m)</b>	23.031	23.049	23.243	23.627	24.101	24.678	25.588	28.430
<b>Cp</b>	0.534	0.535	0.537	0.541	0.545	0.528	0.533	0.544
<b>Cb</b>	0.526	0.510	0.470	0.431	0.394	0.343	0.352	0.271
<b>Cm</b>	0.993	1.103	1.377	1.495	1.538	1.528	1.481	1.320
<b>Cfl</b>	0.056	0.103	0.118	0.134	0.144	0.145	0.180	0.214
<b>LCB (m)</b>	100.44	100.44	100.428	100.437	100.462	100.46	100.471	100.464
<b>LCF (m)</b>	91.793	107.75	97.887	92.968	91.380	90.992	91.199	91.885
<b>Trimado(º)</b>	-0.576	-0.600	-0.802	-1.131	-1.573	-2.027	-2.231	-1.959

**Tabla 116, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**



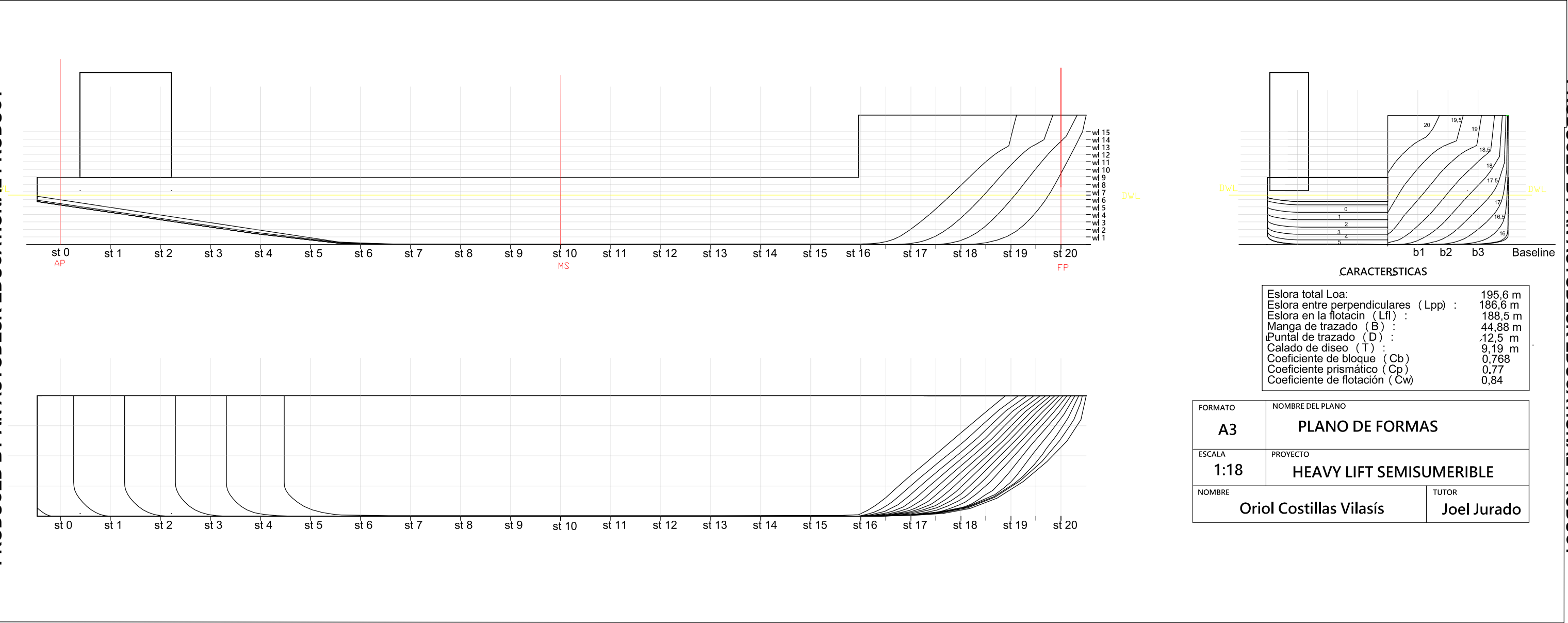
**Calado puntal con carga**

**Large angle stability**

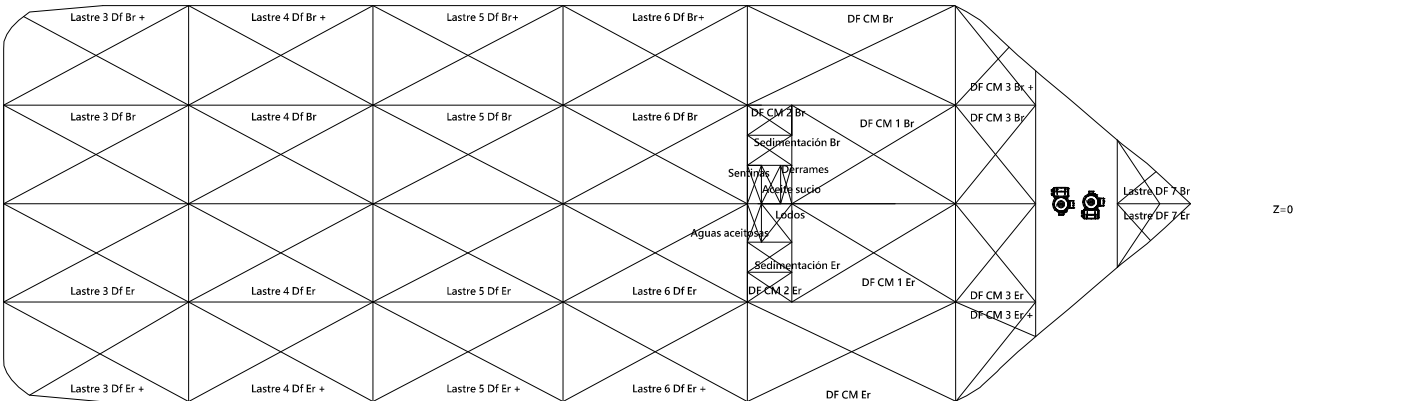
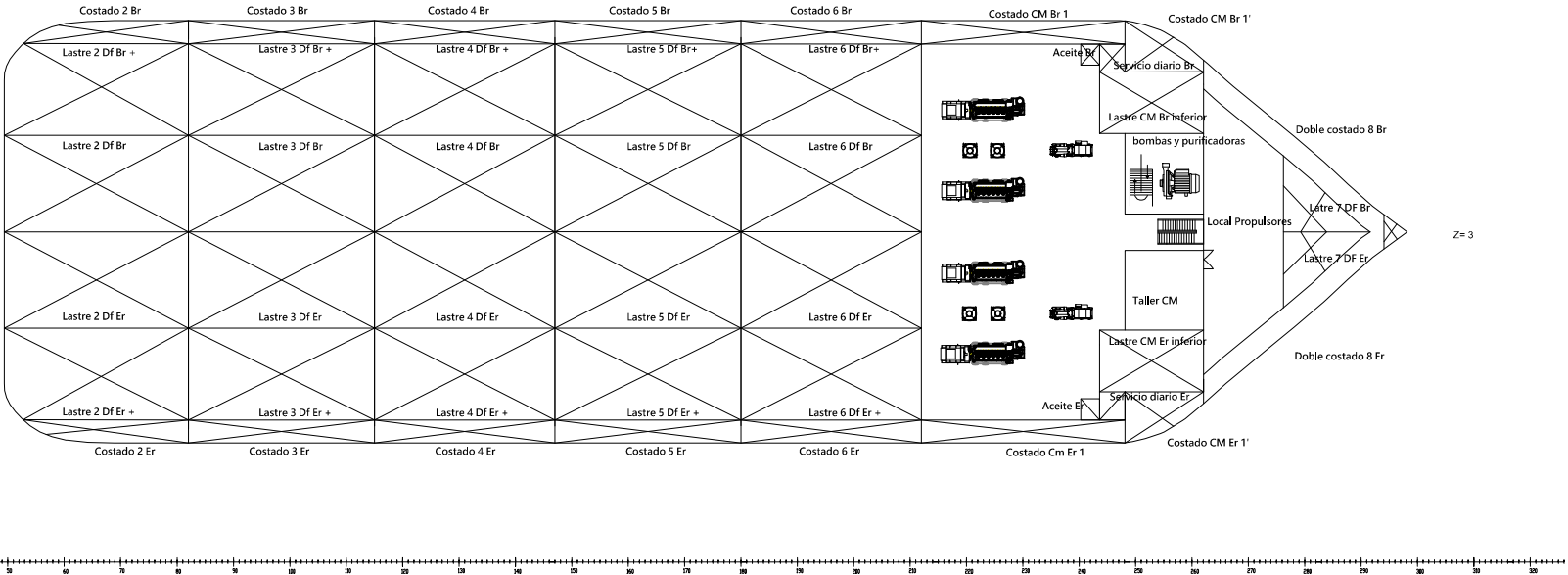
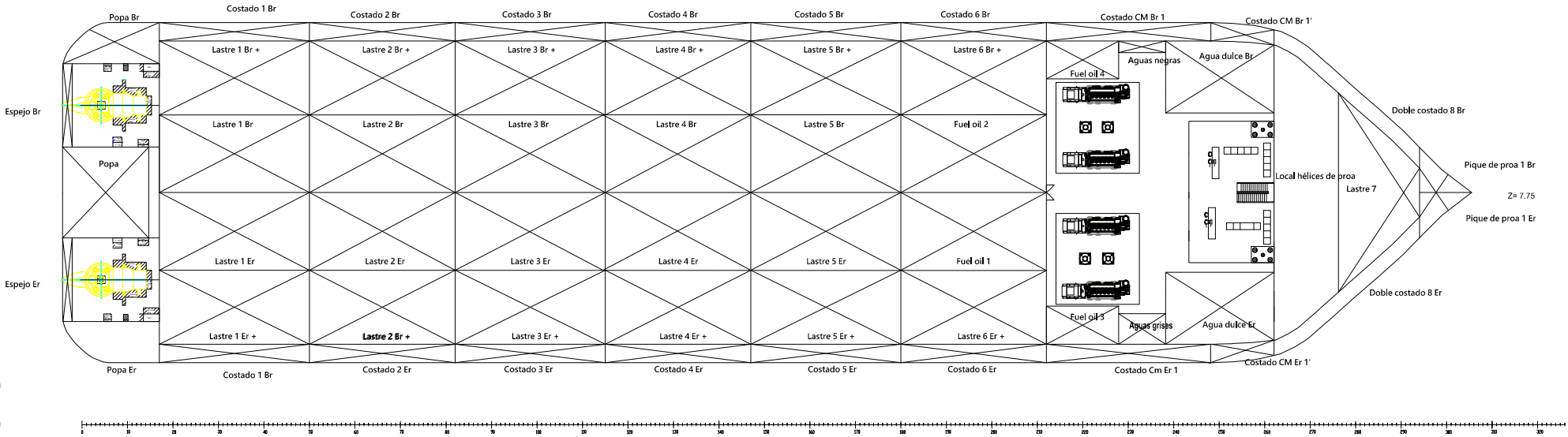
Grados de escora	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
<b>GZ (m)</b>	0.005	0.490	1.422	2.261	2.802	3.561	4.552
<b>Área bajo Gz (m*º)</b>	0.0087	2.1818	11.5280	30.2237	55.6032	87.0757	127.8318
<b>Desplazamiento(t)</b>	88016	88014	88023	88015	88019	88019	88023
<b>Calado en proa(m)</b>	17.152	16.774	16.637	17.006	17.750	18.730	19.554
<b>Calado en popa(m)</b>	12.737	14.172	16.734	19.850	24.468	30.370	38.173
<b>Calado medio(m)</b>	14.945	15.473	16.686	18.428	21.109	24.550	28.863
<b>Cp</b>	0.644	0.618	0.604	0.591	0.577	0.496	0.437
<b>Cb</b>	0.619	0.513	0.417	0.330	0.285	0.214	0.229
<b>Cm</b>	0.991	0.830	0.698	0.737	0.507	0.443	0.539
<b>Cfl</b>	0.083	0.288	0.326	0.335	0.343	0.303	0.305
<b>LCB (m)</b>	94.516	94.485	94.459	94.448	94.380	94.320	94.269
<b>LCF (m)</b>	80.137	96.703	105.433	104.088	106.439	103.742	103.855
<b>Trimado(º)</b>	-1.3554	-0.7990	0.0298	0.8731	2.0619	3.5694	5.6979

**Tabla 117, valores obtenidos del análisis del brazo adrizante**

# Anexo 5: Planos de formas

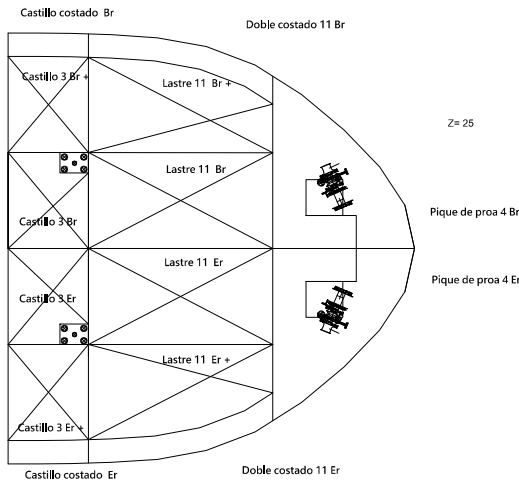
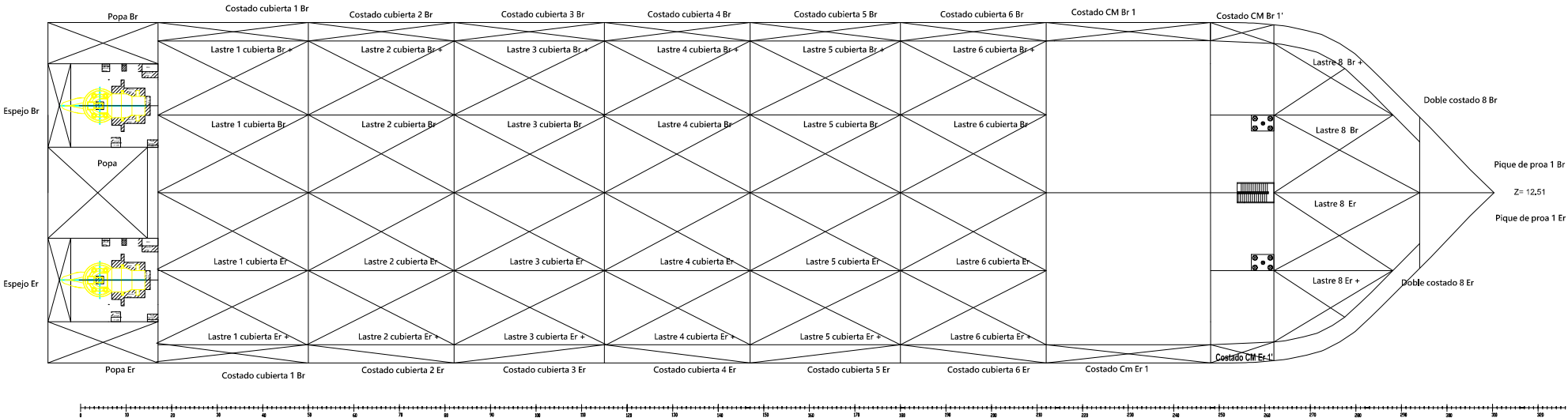
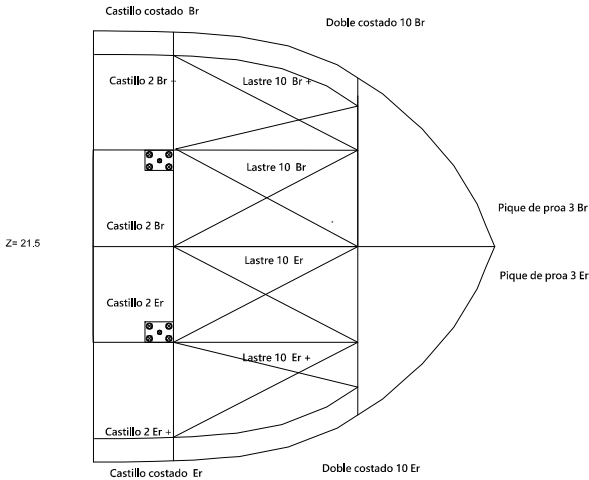
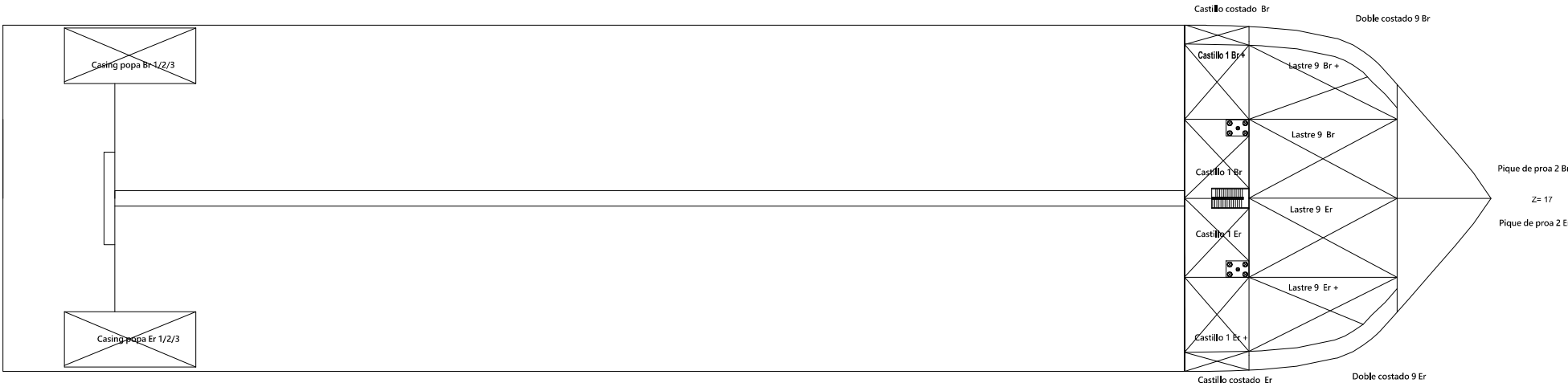
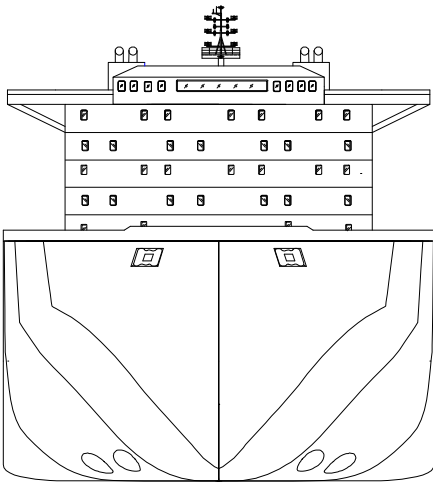
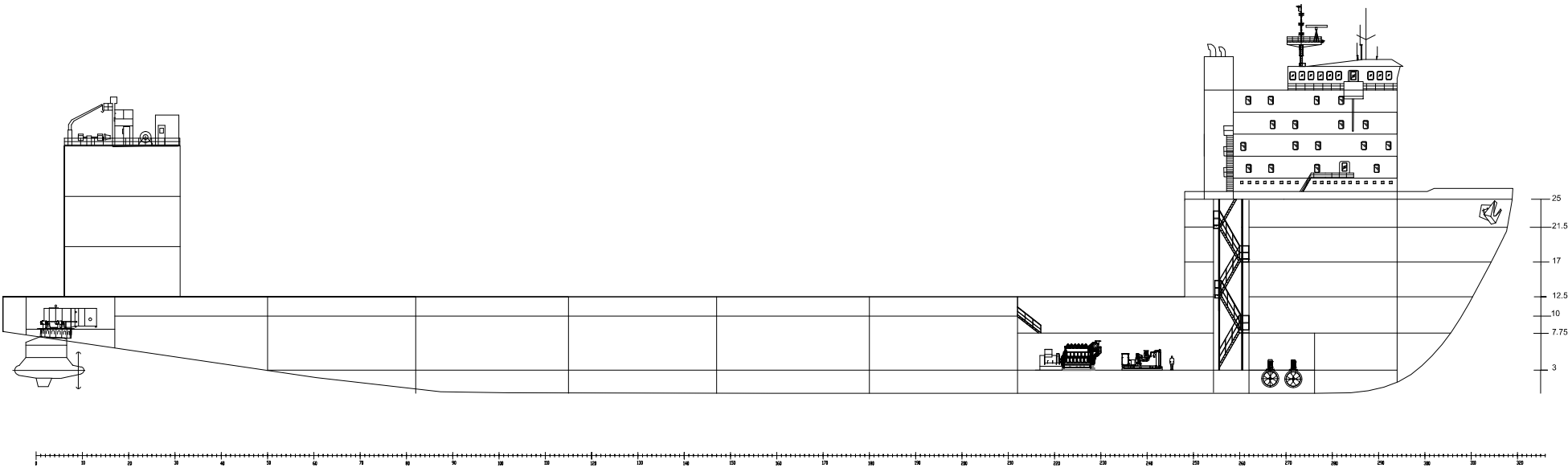


# Anexo 6: Planos de disposición general

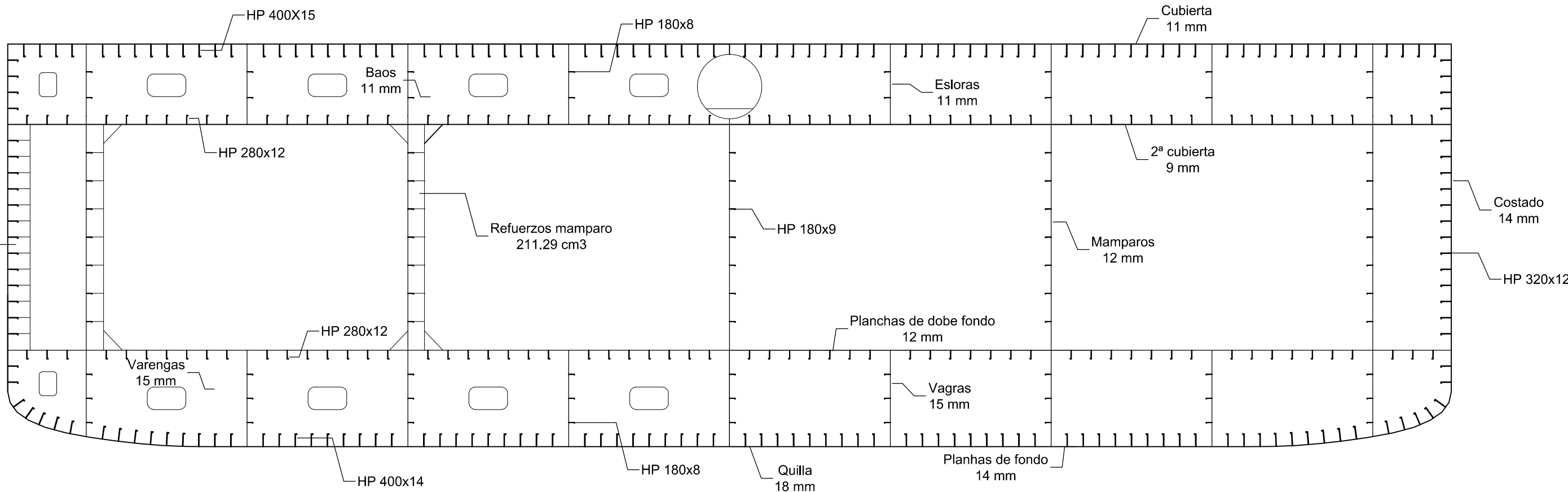


FORMATO	NOMBRE DEL PLANO	
A3	PLANO DE FORMAS	
ESCALA	PROYECTO	
1:20	HEAVY LIFT SEMISUMERIBLE	
NOMBRE		TUTOR
Oriol Costillas Vilasís		Joel Jurado

Eslora total ( LOA ) :	195,6 m
Eslora entre perpendiculares ( Lpp ) :	186,6 m
Eslora en la flotacin ( Lfl ) :	188,5 m
Manga de trazado ( B ) :	44,88 m
Puntal de trazado ( D ) :	12,5 m
Calado de diseo ( T ) :	9,19 m
Coficiente de bloque ( Cb )	0,768
Coficiente prismático ( Cp )	0.77
Coficiente de flotación ( Cw )	0,84



# Anexo 7: Plano de la cuaderna maestra



CARACTERSTICAS

Módulo Resistente:	1,6 x 10^9 cm3
Tipo de acero:	Nv-Ns/ 235 N/mm2
Distancia al eje neutro:	6045.3 mm
Manga de trazado ( B ) :	44,88 m
Puntal de trazado ( D ) :	12,5 m
Calado de diseo ( T ) :	9,19 m
Espaciado de cuadernas:	600 mm
Espaciado de bulárcamas:	2400 mm
Espaciado de vagras:	5000 mm

FORMATO	NOMBRE DEL PLANO	
A3	PLANO DE FORMAS	
ESCALA	PROYECTO	
1:33	HEAVY LIFT SEMISUMERGIBLE	
NOMBRE		TUTOR
Oriol Costillas Vilasís		Joel Jurado